ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Н. Гормаков

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 620.22(075.8)
ББК 30.3.1я73
Г69

Гормаков А.Н.

Г69 Материаловедение и технология обработки конструкционных материалов в приборостроении: учебное пособие / А.Н. Гормаков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 340 с.

В пособии приведены классификация и особенности строения конструкционных и специальных материалов, их свойства и маркировка. Рассмотрены влияние температуры, структуры и состава материала на его свойства и способы повышения стабильности свойств материалов, а также методы получения заготовок и формообразования деталей, оборудования, инструментов и процессов. Описаны процессы формирования покрытий деталей приборов. Рассмотрены материалы и оборудование для нанотехнологий.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 200100 «Приборостроение».

УДК 620.22(075.8)
ББК 30.3.1я73

Рецензенты

Кандидат технических наук, доцент
директор НИИ ООО «ЭРМИС +»
А.Р. Свендровский

Кандидат технических наук
главный металлург НПЦ «ПОЛЮС»
В.Х. Даммер

ПРЕДИСЛОВИЕ

Надежность и долговечность прибора в значительной степени зависит от качества материалов, из которого изготовлены его детали. В настоящее время номенклатура материалов, применяемых в приборостроении, составляет несколько тысяч марок. В процессе конструирования новых приборов необходимо решить очень сложную задачу выбора материалов, наиболее полно отвечающих часто противоречивым требованиям. В особых случаях приходится создавать новый материал. Для решения этих задач необходимы знания о строении и свойствах материалов, взаимосвязи между структурой и свойствами материалов, методах получения требуемых свойств материалов, классах материалов, влиянии факторов окружающей среды на свойства материалов, методах получения заготовок и обработки деталей приборов.

Данное учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 200100 Приборостроение, в процессе изучения дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов». Дисциплина относится к базовой части профессионального цикла дисциплин направления.

В основу книги вошли материалы, изложенные в двух учебных пособиях автора, изданных ранее. Этим книгам была дана рекомендация Сибирского регионального учебно-методического центра для межвузовского использования в качестве учебного пособия для приборостроительных специальностей. Материал книги переработан и дополнен с учётом новых достижений в области материаловедения и технологии обработки материалов.

Учебное пособие состоит из двух частей, шестнадцати глав и приложений. Часть первая «Материаловедение в приборостроении» содержит 8 глав. Первая глава посвящена основам материаловедения. Во введении рассмотрена техническая база современного приборостроения, представлена классификация приборов и конструкционных материалов. Особое внимание уделено свойствам материалов и методам их определения.

Во второй главе рассматриваются основы металловедения, железо и его сплавы, основы теории и технологии термической обработки, химико-термическая обработка. В третьей главе рассмотрены металлы и сплавы, применяемые в приборостроении, их состав, свойства и маркировка.

Четвертая глава посвящена неметаллическим материалам: пластмассам, неорганическим неметаллическим материалам, техническим жидкостям и газам.

В пятой главе рассмотрены структура и свойства композиционных материалов. Шестая глава посвящена материалам для биологических применений и медицины, в том числе, материалам для хирургического инструмента, искусственных сосудов и клапанов сердца, электродов для электрокардиографов и электроэнцефалографов и материалов с эффектом памяти формы. В седьмой главе рассмотрены материалы для микромеханики.

Заключительная восьмая глава первой части посвящена основам выбора материалов при подготовке производства приборов.

Во второй части учебного пособия, состоящей из восьми глав, рассмотрены технологические процессы изготовления заготовок и деталей приборов литьём, штамповкой, прессованием пластмасс, процессы обработки деталей приборов резанием, электрофизические и электрохимические методы обработки, процессы формирования покрытий, технология неразъёмных и разъёмных соединений.

Описания технологических процессов содержат: сведения о действиях, проводимых над объектом производства; сведения об основном технологическом оборудовании, приспособлениях и инструментах; сведения о режимах обработки; сведения о достижимой точности изготовления и качестве поверхности; сведения о производительности метода и целесообразной области его использования.

Заключительная глава посвящена наноматериалам и нанотехнологиям. Рабочая биография наноматериалов начинается только сегодня. Рассмотрены структуры молекул углерода (фуллерены, нанотрубки), на основе которых будут созданы новейшие материалы, обладающие необычными свойствами.

В конце каждой главы приведены контрольные вопросы. В конце каждой части приведён список использованных источников. В приложении приведены таблицы с механическими, теплофизическими и электрическими свойствами материалов, а также таблица химических элементов Д.И. Менделеева с указанием вида кристаллической решётки элементов.

Автор выражает глубокую признательность рецензентам за ценные замечания и полезные советы, которые были учтены при доработке рукописи.

А. Гормаков

Томск, август 2010 г.

ЧАСТЬ I. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Глава I. ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕНИЯ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

1.1.1. Техническая база приборостроения

Прежде чем приступить к изучению строения, свойств и определенных классов материалов, применяемых в приборостроении, необходимо знать:

1. Что представляют собой современные приборы?
2. Какие физические принципы заложены в конструкции приборов?

Технической базой [6] современного приборостроения (рис. 1.1) являются: точная механика, электротехника, электроника, оптика.

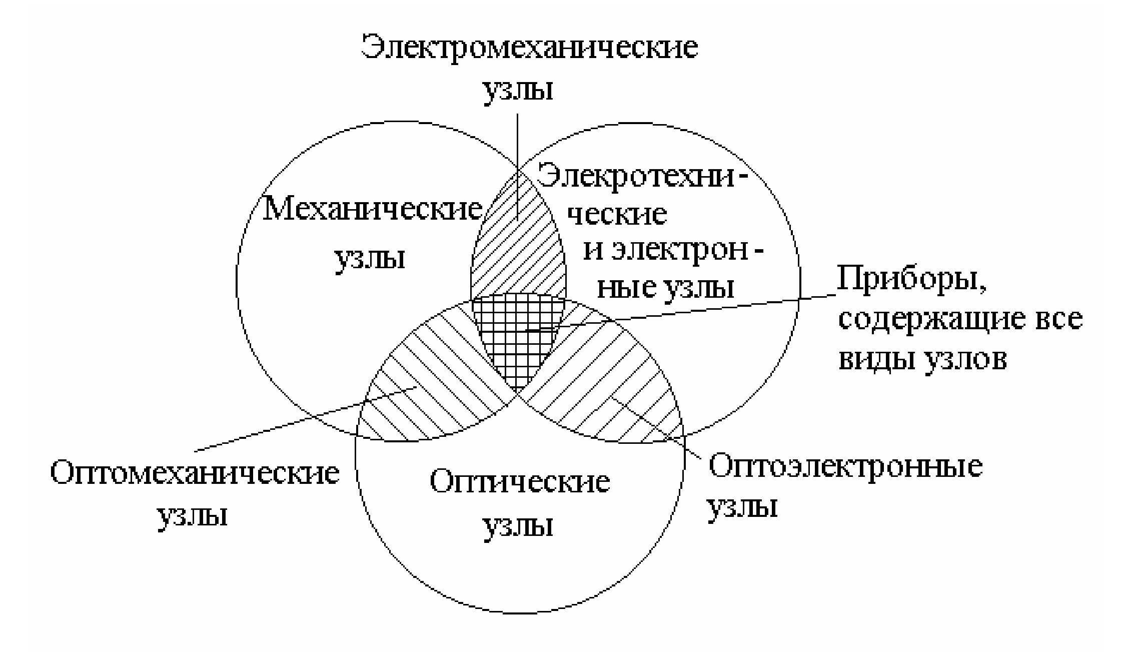


Рис. 1.1. Узлы приборов с различными физическими принципами

1.1.2. Классификация приборов

Все многообразие приборов можно объединить в следующие группы:

1. Приборы для обработки и преобразования различной информации: компьютеры, микропроцессорные системы, принтеры, сканеры, плоттеры, и т.д.
2. Приборы для техники связи: телефоны, факсы, пейджеры.
3. Приборы для измерительной техники – измерители массы, силы, давления, скорости, линейных и угловых размеров, температуры, тока, напряжения, мощности и других физических величин.

4. Приборы навигации, ориентации и стабилизации кораблей, самолетов, ракет и других подвижных объектов (гироскопы, акселерометры, астрономические навигационные приборы и системы), а также скважинные приборы (инклинометры). В настоящее время наиболее приоритетным направлением является разработка и применение навигационных приборов, работающих с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНААС/ GPS).
5. Приборы для автоматизации технологических и производственных процессов. Чувствительные датчики (сенсоры). Приборы 3 и 5 групп взаимосвязаны, т.к. близки по построению.
6. Геодезические приборы и инструменты: теодолиты, нивелиры, дальномеры и др.
7. Приборы для кинотехники, аудио и видеотехники: магнитофоны, плееры, фотоаппараты, видео и кинокамеры и т.д.
8. Медико-биологические приборы, аппараты, системы и комплексы: искусственные сердце, почка и легкое; томографы; кардиографы, лазеры медицинского назначения, хирургические столы и др.
9. Технические игры: механические, электромеханические и радиоуправляемые игрушки, игровые автоматы и т.п.
10. Бытовые приборы: тостеры, стиральные машины, электрические плиты, микроволновые печи и др.

Во всех перечисленных группах приборов могут быть применены узлы, приведенные на рис. 1.1. В табл.1.1. приведены данные, характеризующие примерное соотношение механических, оптических и электронных узлов в различных типах современных приборов.

Таблица 1.1

Доля механических (М), оптических (О), электрических и электронных (Э) узлов в современных приборах, %

Приборные устройства	**М**	**О**	**Э**
Средства связи	15	10	75
Медицинское и лабораторное оборудование	40	20	40
Средства обработки данных	30	10	60

Из структуры современных приборов видно, что для их изготовления необходимы конструкционные материалы, обладающие специальными электрическими, магнитными, теплофизическими, оптически-

ми и другими свойствами. Кроме того, следует учитывать тот факт, что приборы эксплуатируются не только в закрытых отапливаемых помещениях, но и на открытых площадках, на наземных транспортных установках, на самолетах, ракетах, космических аппаратах, на речных и морских судах и подводных лодках, в скважинах на глубинах до 5 км, во всех добывающих и перерабатывающих сырье отраслях промышленности, в машиностроении и т.д. При эксплуатации приборы подвергаются воздействию высоких и низких температур, колебаниям температур, вибрациям, ударам и динамическим перегрузкам, воздействиям высокого и низкого давления, влажности, естественной и искусственной радиации, воздействию магнитных и электромагнитных и электростатических полей. Материалы, применяемые в приборах, должны обеспечить высокую надежность, требуемую точность и долговечность прибора во всех возможных условиях эксплуатации. Для изготовления приборов используются почти все элементы периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

1.1.3. Классификация материалов

Классификация материалов – система соподчиненных понятий в области материаловедения, используемая для установления связей между группами материалов. Наибольшее значение в технике имеют классификации по структурным и функциональным признакам материалов.

Классификация твердых материалов по структурному признаку

Главным критерием классификации материалов по структурным признакам является агрегатное состояние, в зависимости от которого их подразделяют на следующие типы: твердые материалы, жидкости, газы, плазма.

С позиции материаловедения наиболее интересна классификация твердых материалов по структурному признаку [10], критерием которого является порядок в расположении частиц. На рис. 1.2 приведена классификация твердых веществ.

Кристаллические материалы по виду связи между частицами подразделяют на атомные, ионные, металлические и молекулярные. Из атомно-кристаллических материалов, в структуре которых преобладают ковалентные связи, наибольшее значение в технике имеют полиморфные модификации углерода и полупроводниковые материалы на основе элементов IV группы периодической системы элементов. Типичными представителями первых является алмаз – самый твердый материал и

графит – наиболее распространенный в земной коре и устойчивая модификация углерода со слоистой структурой. Полупроводниковые кристаллические германий и кремний являются основными материалами полупроводниковой электроники. В обширную совокупность ионно-кристаллических материалов, имеющих кристаллическую структуру с ионным типом связей, входят окислы металлов, которые являются составляющими руд, технологических присадок при плавке металлов, изделий, формируемых методами порошковой металлургии, а также бориды, карбиды, нитриды (соединения металлов с бором, углеродом, азотом), которые используют как компоненты твердых сплавов.

Свойствами металлических кристаллов обладают более 80 химических элементов и множество сплавов.

Структура молекулярных кристаллов характерна для многих полимерных материалов, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев. Это биополимеры – высокомолекулярные природные соединения и их производные; синтетические полимеры, получаемые из простых органических соединений методами полимеризации и поликонденсации; неорганические полимеры, молекулы которых имеют неорганические главные цепи и не содержат органических боковых групп. К числу неорганических полимеров относят силикаты и вяжущие.

Некристаллические твердые материалы разделяют по признакам упорядоченности и стабильности структуры на аморфные, стеклообразные и полуразупорядоченные нестеклообразные. Типичными представителями аморфных материалов являются аморфные полупроводники, аморфные металлы и сплавы.

В группу стеклообразных материалов входит ряд органических полимеров (полиметилметакрилат при температурах ниже 105 °С, поливинилхлорид – ниже 82 °С и другие), а также многие неорганические материалы – неорганическое стекло на основе оксидов кремния, бора. Алюминия, фосфора и т.п.; многие материалы для каменного литья – базальты и диабазы со стеклообразной структурой, металлургические шлаки, природные карбонаты с островной и цепочной структурой (доломит, мергель, мрамор и др.).

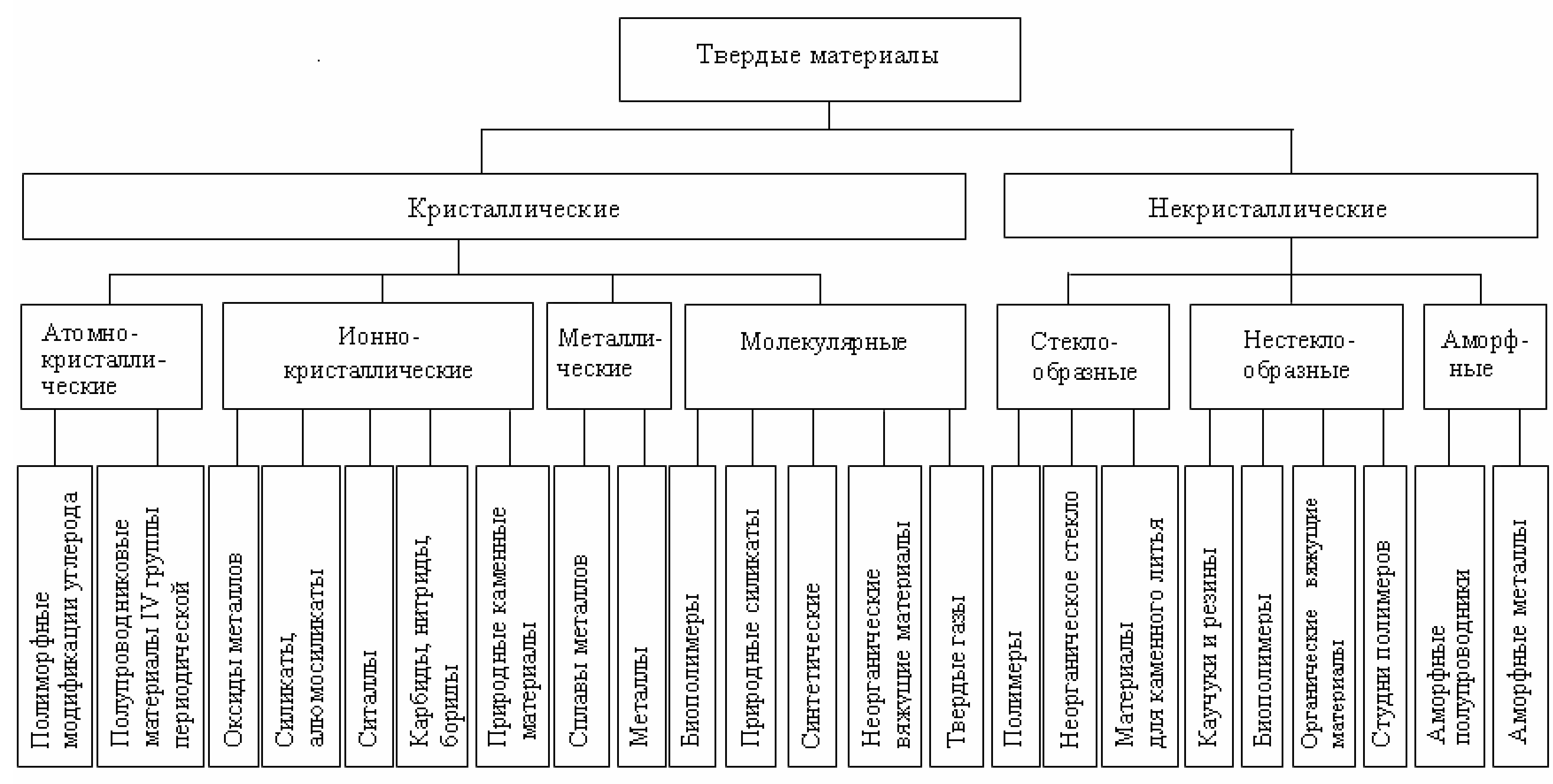


Рис. 1.2. Классификация твёрдых материалов по структурному признаку

Классификация материалов по назначению

В связи с конструктивными особенностями приборов наибольший интерес для приборостроителей представляют следующие классы материалов: *конструкционные, электротехнические, триботехнические, инструментальные, технологические, медицинского и биологического применений.*

Конструктивные – твердые материалы, предназначенные для изготовления деталей, подвергаемых механическому нагружению. К ним относятся: металлы, сплавы, керамика, пластмассы, композитные материалы (композиты). Из них делают валы, оси, корпуса и т.д.

Электротехнические – материалы, характеризующиеся особыми электрическими и магнитными параметрами и предназначенные для изготовления изделий, применяемых для производства, передачи, преобразования электроэнергии.

Триботехнические – материалы, предназначенные для применения в узлах трения (подшипники и т.д.) с целью регулирования параметров трения и изнашивания, для обеспечения заданной работоспособности и ресурса этих узлов.

Инструментальные – отличаются высокими показателями твердости, износоустойчивости и прочности, они предназначены для изготовления режущего, мерительного, слесарно-монтажного и другого инструмента.

Технологические – это группа вспомогательных материалов, используемых для нормального протекания технологических процессов переработки основных технологических материалов или нормальной работы машин (азот, аргон, спирт, бензин, спирто-бензиновые смеси и другие, которые применяют для промывки деталей).

Материалы для биологического и медицинского применений - материалы для изготовления имплантантов, электродов, деталей и узлов биологических и медицинских аппаратов, материалы для хирургических инструментов и т.д.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой современные приборы? Какие физические принципы заложены в конструкции приборов?
2. Какова доля механических, оптических, электротехнических и электронных узлов в современных приборных устройствах различного назначения?
3. Классифицируйте твердые материалы по структурному признаку.

1.2. Свойства материалов

Работоспособность приборов в значительной мере зависит от свойств материалов. Ниже приведены данные структурной обусловленности механических, тепловых, электрических, магнитных и технологических свойств материалов, приведены параметры свойств, используемые в технике при выборе материалов и прогнозировании работоспособности изделий.

1.2.1. Механические свойства материалов

В процессе работы механизмов приборов детали под действием нагрузок подвергаются деформированию. Деформирование – изменение относительного расположение частиц в материале. В результате деформирования происходит деформация – изменение формы и размеров детали или его частей.

Прочность материала

Прочность – свойство материалов сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок.

Виды деформирования: сжатие; растяжение; изгиб; кручение; сдвиг.

На рис. 1.3. приведена схема деформации изгиба консольно защемленной балки под действием нагрузки Р. Величину смещения f конца балки под нагрузкой принято называть стрелой прогиба. Такой вид деформации в приборах испытывают плоские пружины, оси, зубья зубчатых колес и шестерен и т.д.

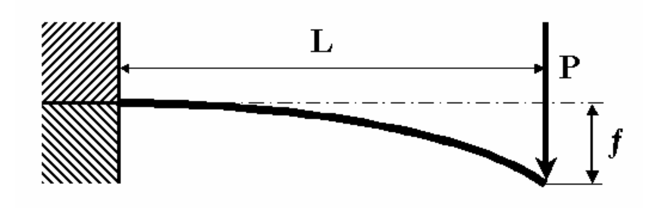


Рис. 1.3. Деформация изгиба консольной балки: L – длина балки, P – нагрузка, f – стрела прогиба балки

Деформацию называют упругой, если она исчезает после снятия нагрузки, или пластической, если она не исчезает (необратима).

Значения прочности материалов, полученные экспериментально, в 400 – 1000 раз меньше значений теоретической прочности. Это обусловлено дефектами структуры материалов. Реальные материалы характеризуются технической прочностью, основные характеристики которой удобно рассмотреть с помощью диаграммы растяжения (рис.1.4,а) образца (рис.1.4, б) из пластичного материала.

Критерии прочности основных материалов определяют при статических нагрузках. Статическими называют нагрузки, не изменяю-

изменяющиеся или изменяющиеся во времени монотонно, с малой скоростью. Основными критериями прочности при статических нагрузках являются временное сопротивление $\sigma_{в}$ или предел текучести $\sigma_{т}$ ($\sigma_{0,2}$). Временное сопротивление и предел текучести в данном случае – характеристики, являющиеся напряжениями. Напряжение определяется как отношение нагрузки к площади ее приложения $\sigma = F/S$, где $S = \pi d^2/4$ – площадь поперечного сечения образца.

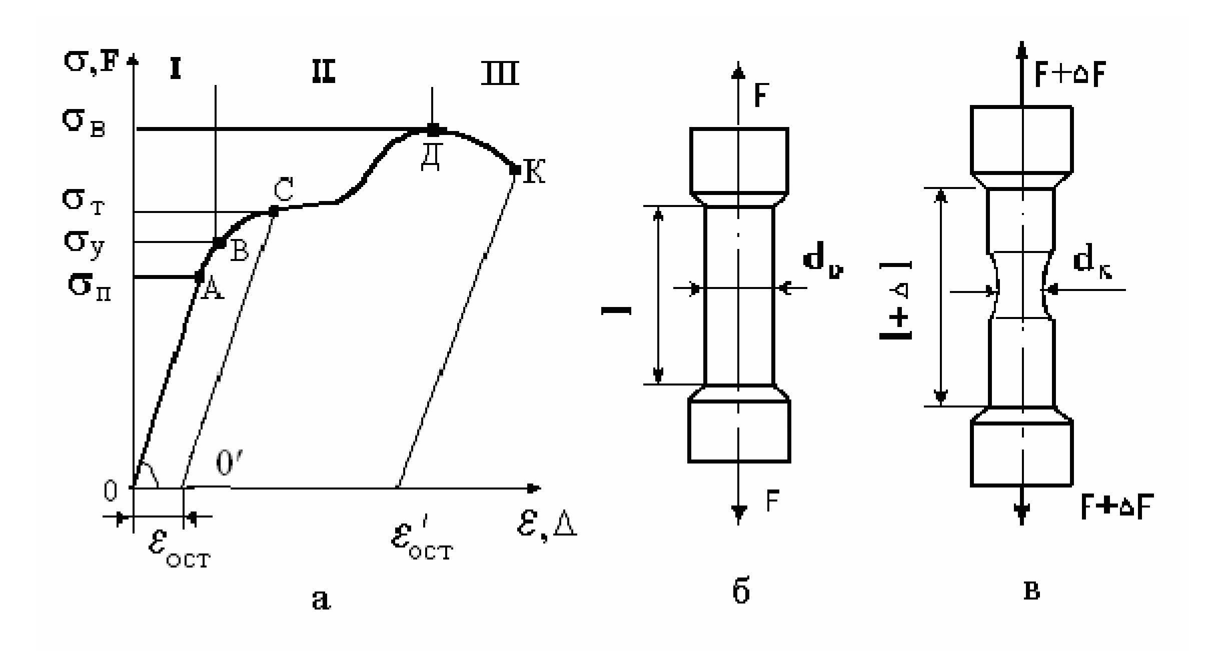


Рис. 1.4. Зависимость нормального напряжения σ в образце от его относительного удлинения ε при растяжении (а); размеры и форма образца при нагружении слой F (б) и при нагружении силой F+ ΔF, вызывающей текучесть материала (в); Δl – абсолютное удлинение; ε – относительное удлинение; $\sigma_{п}$ – предел пропорциональности; $\sigma_{у}$ – предел упругости; $\sigma_{т}$ - предел текучести; $\sigma_{в}$ – предел прочности (временное сопротивление)

Как следует из определения, напряжение растет по мере роста нагрузки. Причем до определенного значения нагрузки образец пропорционально удлиняется, и после снятия нагрузки размер его восстанавливается. Однако наступает момент, когда после удлинения образец так и остается удлиненным. При дальнейшем росте нагрузки от F до F+ ΔF и при удлинении образца от l до l+ Δl на его цилиндрической части образуется утонение или шейка (рис. 1.4, в). Принято говорить, что в этом месте материал “течёт”. При росте нагрузки диаметр поперечного сечения образца в шейке уменьшается, затем наступает момент (рис. 1.4, а), когда материал разрушается (точка К).

При первоначальном нагружении образца характеристика проходит через точки А, В, С (рис. 1.4, а). В случае полной разгрузки образца из пластичного материала, прошедшего зону текучести (точка С), в нем наблюдается остаточная деформация $\varepsilon_{ост}$.. При повторном нагружении образца характеристика идет по линии 0′С. Разгрузка после нагружения также идет по линии С0′). В результате чего предел пропорциональности увеличивается. Эта операция называется *наклепом* и используется для увеличения прочности материала. При этой операции повышается предел пропорциональности.

$\sigma_п$ – *предел пропорциональности* - напряжение, при котором отступление от линий зависимости между напряжением и деформацией достигает некоторого значения, установленного техническими условиями. Эта характеристика является верхней границей области напряжений, где реализуется закон Гука.

$\sigma_у$ – *предел упругости* – напряжение, при котором остаточные деформации достигают значения, установленного техническими условиями. Обычно допуск на остаточную деформацию составляет $\varepsilon_{ост} = 10^{-3} \div 10^{-2}\%$.

$\sigma_т$ - *предел текучести* – напряжение, при котором обычно остаточная деформация не превышает 0,2 %. Тогда условный предел текучести обозначается $\sigma_{0,2}$.

$\sigma_в$ – *предел прочности* (временное сопротивление или разрушающее напряжение). Остаточная деформация при разрыве для пластичных материалов $\varepsilon_{ост} > 5$ %.

На диаграмме (рис. 1.4, а) можно выделить три области: I – область упругой деформации; II – область пластической деформации; III – область развития трещин и разрушения.

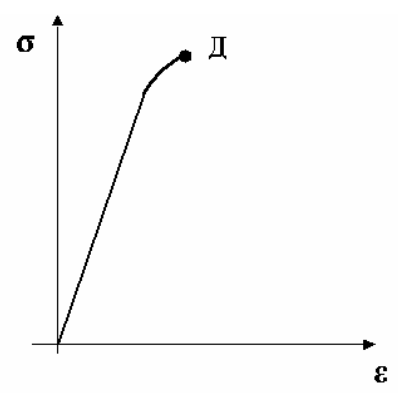


Рис. 1.5. Диаграмма растяжения хрупкого материала

Рассмотренная характеристика справедлива для пластинчатых материалов, к которым относятся, например, алюминий, сталь, медь и их сплавы. Предел прочности $\sigma_в$ - основная характеристика механических свойств хрупких материалов, т.е. материалов, которые разрушаются при малых пластических деформациях (рис. 1.5). К хрупким материалам можно отнести чугун, керамику. В точке Д – разрыв материала. Остаточная деформация при разрыве для хруп-

ких материалов $\varepsilon_{ост} < 5\,\%$.

Как отмечалось выше, до точки А диаграммы рис. 2.2,а существует пропорциональная зависимость между напряжением σ и относительной деформацией $\varepsilon = \sigma/E$, где Е – модуль упругости первого рода или модуль Юнга. Или $\sigma = E \cdot \varepsilon$, $E = \operatorname{tg}\alpha$, где α – угол наклона характеристики. Закон Гука может быть записан в виде:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot S},$$

где: F – нагрузка; Δl – деформация; S – площадь поперечного сечения; Е – модуль Юнга; l_0 – начальная длина образца.

Модуль Юнга необходимо знать при расчете деталей на жесткость. Значение модуля Юнга для некоторых материалов приведены в табл. 1.2

Таблица 1.2

Значения модуля Юнга для некоторых материалов

Материал	Е, МПа
Сталь	$(2…2,2)\cdot 10^5$
Бронза	$(0,9…1,15)\cdot 10^5$
Алюминий	$0,7\cdot 10^5$
Текстолит	$0,67\cdot 10^4$
Капрон	$1\cdot 10^3$

Твердость материала

Твердость – свойство материалов оказывать сопротивление пластичной деформации при контактном воздействии в поверхностном слое. В зависимости от способа внедрения в образец более твердого тела - индентора, твердость материалов оценивается по различным критериям (рис. 1.6), используя несколько методов. Наибольшее распространение получили три группы методов: вдавливание индентора, динамические методы, царапание. Широкое распространение этих методов объясняется тем, что не требуются специальные образцы. Это неразрушающие методы контроля.

Рассмотрим подробнее методы вдавливания индентора, как наиболее распространенный метод определения твердости в условиях приборостроительного предприятия. При этом методе в качестве индентора могут применяться разные тела (табл.1.3).

Таблица 1.3

Формы инденторов

Название метода	**Форма индентора**
Метод Бринелля	шарик
Метод Раквелла	конус, шарик
Метод Виккерса	алмазная пирамидка



Рис. 1.6. Методы определения твердости материалов

Метод Бринелля

(ГОСТ 9012 – 59, действует)

Стальной шарик вдавливается в поверхность, и по диаметру отпечатка судят о твердости НВ (рис. 1.7). Рассчитать значение твердости по Бринеллю можно по формулам:

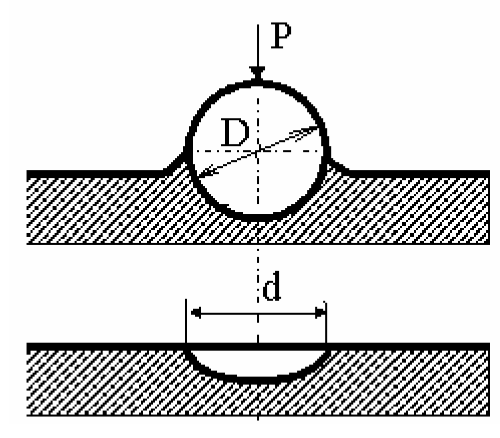


Рис. 1.7. Схема метода Бринелля

$$HB = \frac{0{,}102 \cdot 2P}{\pi D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)},$$

когда нагрузка P выражена в Ньютонах, и

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)},$$

когда P выражена в килограммах.

Диаметр шарика может быть равным: 2,5 мм; 5мм; 10мм. Нагрузка P, в зависимости от диаметра шарика и измеряемой твердости: для термически обработанной стали и чугуна – $P = 30D^2$, литой бронзы и латуни – $P = 10D^2$, алюминия и других очень мягких металлов – $P = 2{,}5D^2$. Продолжительность выдержки τ: для стали и чугуна – 10 с, для латуни и бронзы – 30 с.

Условные обозначения твердости по Бринеллю HB170 10 /3000 /10. Это означает, что твердость 170 , диаметр шарика 10 мм, нагрузка 3000 кг, время выдержки – 10 секунд.

Метод Роквелла

(ГОСТ 9013 – 59, действует)

По этому методу определяется глубина вдавливания индентора (рис. 1.8). При нагрузке P_0 = 10 кг измеряют по шкале прибора глубину проникновения индентора – h_0; затем прикладывают нагрузку P_1 = 50 кг; измеряют глубину h при действии суммарной нагрузки P = 60 кг.

Предварительную нагрузку дают для того, чтобы показатели твердости соответствовали структурному состоянию основного тела детали, поскольку свойства поверхности всегда отличаются от свойств сердцевины. Вот почему вычисляют глубину, на которую внедрится наконечник под действием силы P_1 , т.е. на величину $h - h_0$. При подсчете твердости по Роквеллу за единицу берут углубление наконечника после усилия P_0 на величину, равную 0,002 мм. Число твердости по Роквеллу рассчитывается по формуле:

$$HR = N - \frac{(h - h_0)}{0{,}002},$$

где N – число делений на шкале указателя прибора (твердомера) Роквелла; 0,002 мм – цена деления шкалы прибора.

Для удобства использования замеров твердости разных металлов

на приборе имеется три шкалы: А, В и С. В зависимости от формы индентора и значений нагрузок вдавливания к символу HR добавляют буквы А, В или С: HRA - конус, HRC – конус, HRB – шарик. Всего делений N на шкалах А и С нанесено 100, а число делений N на шкале В – 130 (при испытании шариком).

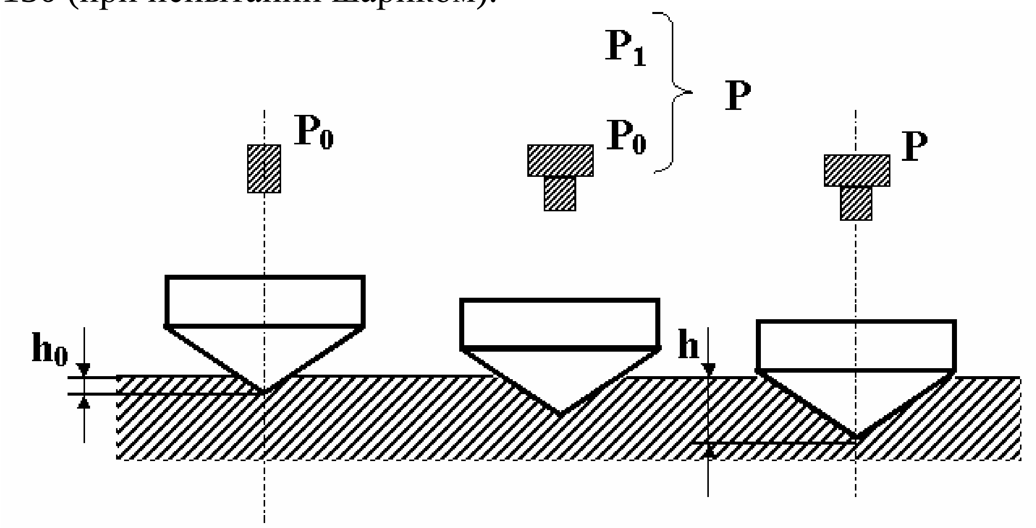


Рис. 1.8. Схема метода Роквелла

В зависимости от природы материала используют три шкалы твердости (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Шкалы для определения твердости по Роквеллу

Шкала	Обозначение	Индентор	Нагрузка, кг			Область применения
			P0	P1	P2	
A	HRA	Алмазный конус < 1200	10	50	60	Для особо твёрдых материалов
B	HRB	Стальной закаленный шарик ∅1/16''	10	90	100	Для относительно мягких материалов
C	HRC	Алмазный конус < 1200	10	140	150	Для относительно твёрдых материалов

Метод Виккерса

(ГОСТ 2999 – 75, действует)

Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды, в образец под дей-

ствием нагрузки Р и измерении диагонали отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки. Диагональ отпечатка *d* измеряется при помощи микроскопа, установленного на приборе. Преимущество данного способа в том, что можно измерять твердость любых материалов, тонкие изделия, поверхностные слои. Нагрузка Р может меняться от 9,8 до 980 Р. Твердость по Виккерсу

$$HV = 0{,}189 \cdot \frac{P}{d^2}, \text{ если Р выражена в Н;}$$

$$HV = 1{,}854 \cdot \frac{P}{d^2}, \text{ если Р выражена в кгс.}$$

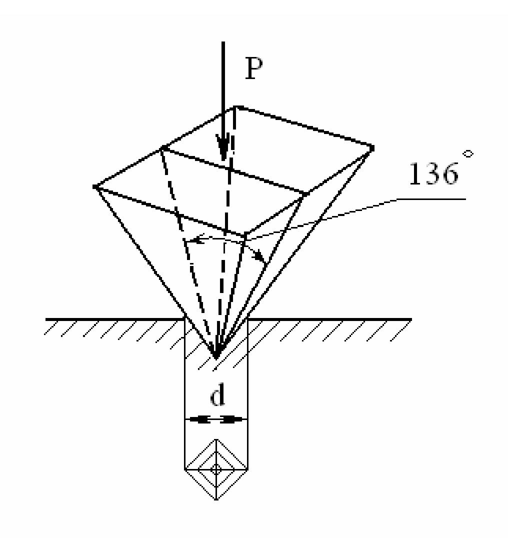


Рис. 1.9. Схема метода Виккерса

Твёрдость по Шору

У этого термина существует два значения. Хотя и в том и в другом значении – это метод измерения твёрдости, оба метода предложены одним и тем же автором, имеют совпадающие названия и совпадающие обозначения шкал – это не версии одного метода, а два принципиально разных метода с разными значениями шкал, описываемых разными стандартами.

Твёрдость по Шору [ГОСТ 23273-78 Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору)].

Этот метод предназначен для определения твёрдости очень твёрдых материалов, преимущественно металлов. Твердость по этому методу Шора оценивается в условных единицах, пропорциональных высоте отскока бойка. Метод предложен американским промышленником Альбертом Ф. Шором в 1906 году. Обозначается HSx, где H – Hardness, S – Shore и x – латинская буква, обозначающая тип шкалы, использованной при измерении. Например: 85HSD.

Метод не дает точных показаний, так как высота отскакивания бойка зависит не только от твердости испытуемого металла, но и от множества других причин: от толщины металла, от степени шероховатости его поверхности, внутренней структуры и т. д. Однако этот метод, вследствие его простоты и оперативности, часто применяется в заводской практике – преимущественно для быстрого контроля результатов термической обработки стальных изделий (закалки и отпуска). Он так же позволяет производить измерения прямо на готовых изделиях, крупногабаритных деталях и криволинейных поверхностях.

Основные шкалы C и D. Шкала прибора имеет 140 равных делений. В шкале Шора за 100 единиц принята максимальная твёрдость, стабилизированного после закалки на мартенсит образца из углеродистой инструментальной стали, что соответствует высоте отскока бойка 13,6± 0,3 мм. Цена деления должна быть не более 1-й единицы твёрдости по Шору.

Твёрдость по Шору для углеродистой стали связана с твёрдостью по Бринеллю и пределом прочности при растяжении $\sigma_в$ следующей зависимостью: $\text{HB} \approx 7\text{H}S$; $\sigma_в \approx 2{,}5\text{H}S$.

Склероскопы Шора (рис. 1.10) снабжаются бойком 1 с алмазным наконечником 4 сферической формы. Склероскоп Шора модели C представляет собой полую трубку 3 с окном, на котором нанесены деления шкалы, в ней падает лёгкий боёк массой 2,5 г и радиусом сферы алмаза 1,25 мм. Высота отскока регистрируется визуально. Для испытания мягких материалов допускается применение бойка со стальным тупым наконечником.

Склероскоп Шора модели D представляет собой полую трубку, в которой падает тяжёлый боёк массой 36 г и радиусом сферы алмаза 1 мм. Высота отскока регистрируется либо механическим индикаторным устройством, либо электронным. В первом случае значения твёрдости получаются менее точными, вследствие увеличения потерь. В верхней части трубки имеется фиксирующе-спусковой механизм, предназначенный для удержания и отпускания бойка.

Трубка склероскопа является съёмной частью, устанавливаемой на специальную подставку (штатив), имеющую в своём составе предметный столик. Склероскопы Шора снабжаются эталонами твёрдости.

Испытание проводят при температуре окружающей среды 20^{+15}_{-10} °C. При измерении непосредственно на изделии его масса должна составлять не менее 5 кг. Масса образцов, устанавливаемых на столик твердомера, должна составлять не менее 0,1 кг и они должны иметь толщину не менее 10 мм.

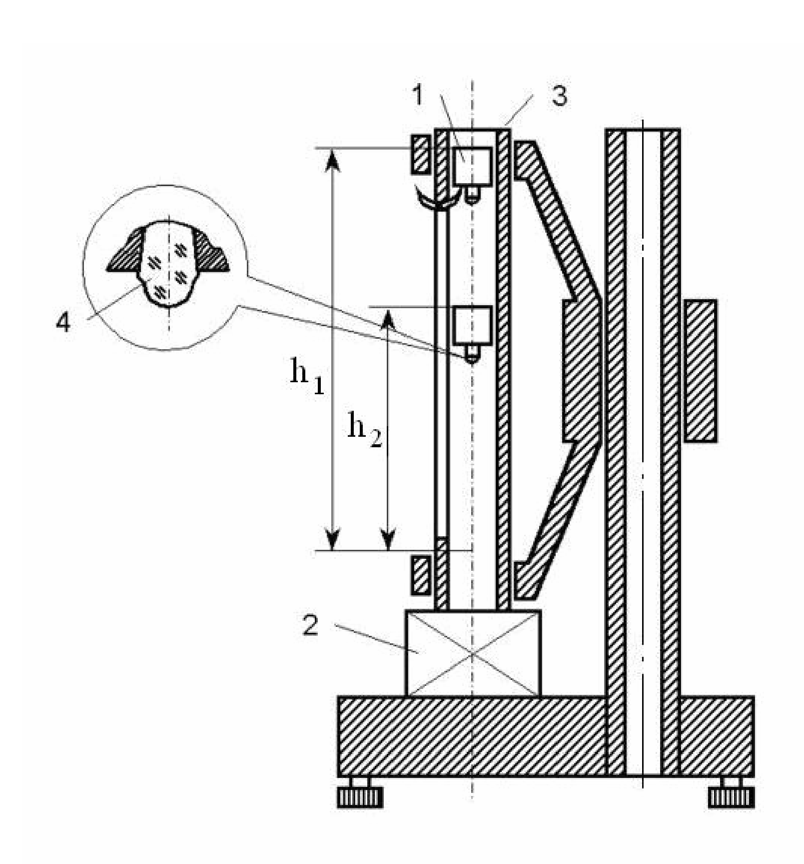


Рис. 1.10. Схема склероскопа Шора: 1 – боёк, 2 – испытуемый образец, 3 – трубка склерометра, установленная на штатив, 4 – алмаз

Поверхность испытуемого изделия или образца должна быть свободной от масла и грязи, иметь шероховатость не более R_a = 2,5 мкм по ГОСТ 2789-73.

Поверхность столика прибора должна быть ровной, свободной от масла и грязи. Перед испытанием склероскоп устанавливается вертикально по уровню или отвесу, а поверхность испытуемого образца или изделия – горизонтально. Образец, устанавливаемый на столик прибора, плотно зажимается на нём. Для цилиндрических образцов используют V-образную подставку. Изделия больших размеров испытываются с помощью съёмной части прибора. Основание прибора плотно прижимается к испытуемому образцу или изделию. Проводят не менее 5-ти измерений в разных местах на исследуемом участке образца или изделия, но на расстоянии не менее 2 мм между двумя соседними отпечатками и от края образца или изделия. Среднее арифметическое результатов измерения принимается за твёрдость данного образца или изделия при условии, что разность между наибольшим и наименьшим значением результатов измерений не превышает 5 единиц. В случае отличия более чем на

5 единиц, испытание повторяют, удвоив количество измерений. Полученную твердость по Шору указывают с округлением до целой единицы шкалы.

Твёрдость по Шору. Метод вдавливания. ISO 868 (DIN 53505, ASTM D2240)

Данный метод, как правило, используется для измерения твердости низкомодульных материалов (полимеров): пластмасс, эластомеров, каучуков и продуктов их вулканизации. Метод и шкала были предложены Альбертом Ф. Шором в 1920-х годах. Он же разработал соответствующий измерительный прибор, называемый дюрометром.

В конструкции дюрометров Шора (рис. 1.11) типов А и D входят следующие части:

1. Опорная поверхность (площадь не менее 100 мм²) с отверстием диаметром от 2,5 до 3,5 мм, центр которого находится на расстоянии не менее 6 мм от любого края опоры.
2. Индентор в виде закаленного стального стержня диаметром 1,10 – 1,40 мм.
3. Индикаторное устройство, показывающее степень выдвижения кончика индентора за пределы опорной поверхности.
4. Калиброванная пружина для приложения к индентору силы.

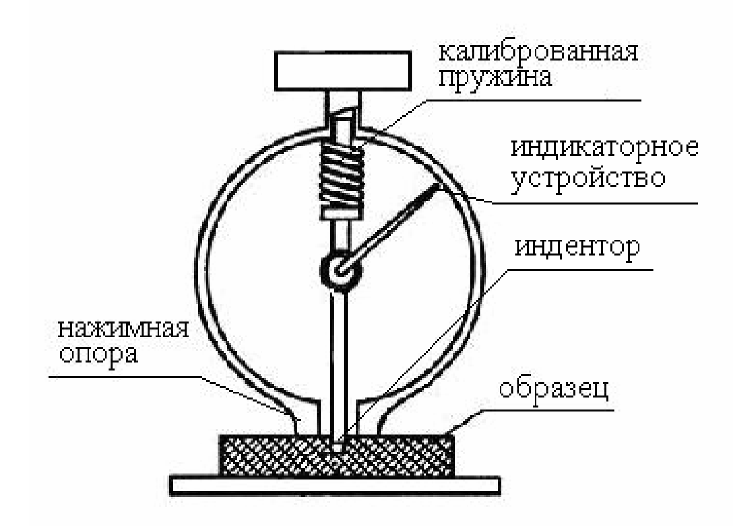


Рис.1.11. Конструкция дюрометра Шора

Твердость при вдавливании обратно пропорциональна глубине вдавливания индентора и зависит от модуля упругости и вязкоэластичных свойств материала. Эта твердость определяется дюрометрами двух типов, оба из которых имеют калиброванные пружины для приложения нагрузки к индентору. Дюрометр А (рис.1.12 а) применяется для более мягких материалов, а дюрометр D (рис.1.12 б) – для

более твердых.

Помимо этого стандарт ASTM D2240 предусматривает в общей сложности 12 шкал измерений, используемых в зависимости от целевой задачи; различают типы A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S и R. Примерное соотношение разных шкал приведены в таблице 1.5.

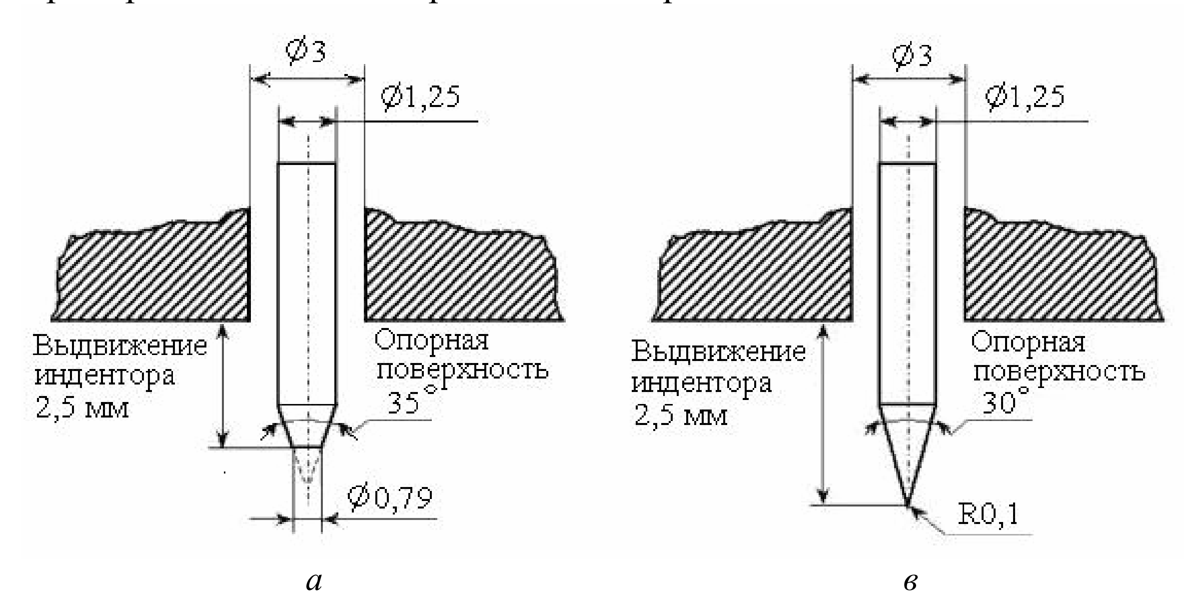


Рис. 1.12. Индентор для дюрометра: а - типа А; в – типа D

Таблица 1.5

Соотношение между некоторыми шкалами дюрометров Шора

A	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
B				6	12	17	22	27	32	37	42	47	51	56	62	66	71	76	81	85
C						9	12	14	17	20	24	28	32	37	42	47	52	59	70	77
D						6	7	8	10	12	14	16	19	22	25	29	33	39	46	58

Твёрдость по Шору обозначается в виде числового значения шкалы, к которому приписывается буква, указывающая тип шкалы с явным указанием названия метода измерения твердости или прибора. Например: «Твердость по Шору 80А» или «Твердость по дюрометру 80А».

Не существует простой зависимости между твердостью, определяемой с помощью данного метода, и каким-либо фундаментальным свойством испытуемого материала. Метод отличается сравнительно большим разбросом значений результатов измерений, но удобен своей простотой и оперативностью проведения измерений. Позволяет производить их, в том числе, на готовых изделиях, крупногабаритных деталях и криволинейных поверхностях достаточно больших радиусов. Из-за чего получил широкое распространение в производственной практике.

Динамическая прочность

Динамическая прочность – сопротивление материалов динамическим нагрузкам, т.е. нагрузкам, значение, направление и точка приложения которых быстро изменяются во времени. Под действием динамических нагрузок (удара, взрыва и т.п.) деформирование материалов имеет специфические черты.

Запаздывание текучести – это явление, которое характеризуется тем, что при мгновенном приложении нагрузки, вызывающей текучесть при статическом нагружении, пластическая деформация наступает не сразу, а по истечении некоторого промежутка времени - так называемого *периода западания текучести*. Если нагрузку снять до этого времени, остаточная деформация не возникает, т.е. материал деформируется упруго. Вследствие запаздывания текучести пластичные при статическом нагружении материалы могут разрушаться хрупко под действием ударных нагрузок. Для оценки склонности материалов к запозданию текучести введена специальная характеристика – *ударная вязкость*, измеряемая работой разрушения надрезанного образца при ударном изгибе на маятниковом копре (рис. 1.13)

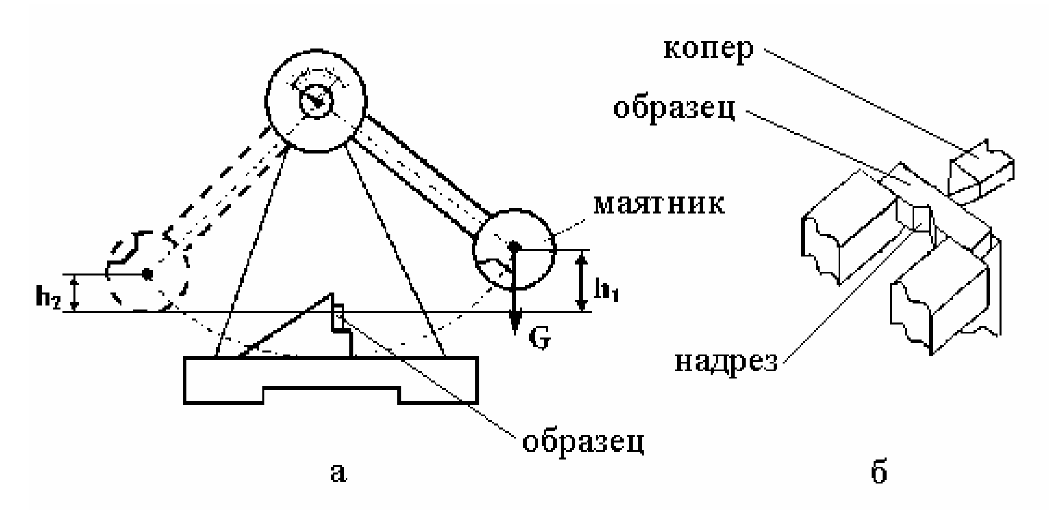
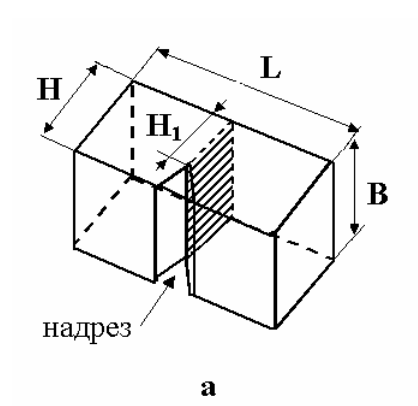


Рис. 1. 13. Схема маятникового копра (а), испытания на удар (б)

Определяется высота подъема маятника до и после удара. В образце заранее делается надрез (концентратор напряжения) различного рода. После удара образец разрушается. Работа, затрачиваемая на разрушения образца $K = G \cdot (h_1 - h_2)$, где: h_1 – высота подъема маятника до удара, h_2 – высота подъема после удара.

В соответствии с ГОСТ 9454 – 78 и ГОСТ 4647 – 80 образцы имеют надрезы по форме V,U, T- образные (рис. 1.14)



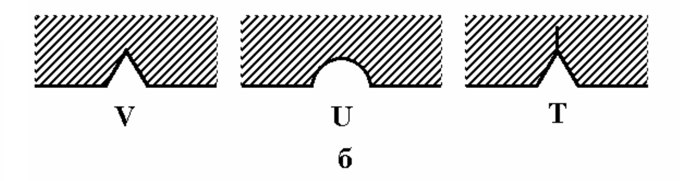


Рис. 1.14. Образец для испытания на ударную вязкость и формы надрезов

Ударная вязкость – полная работа удара, вызвавшего разрушение образца, отнесенная к площади его сечения КС = К/S, Дж/м ^{2}, $S = H_1 \cdot B$ - площадь поперечного сечения.

Пример обозначения ударной вязкости. $KCT^{+100}150/3/7{,}5$, где: Т – вид надреза; +100 – температура, °С; 150 – энергия удара, Дж; 3 – глубина надреза; 7,5 – ширина образца, мм.

Испытание на ударный изгиб при t = - 100… - 269 °С производят по ГОСТ 22848 – 77.

Усталость материала

Усталость материала – процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств материалов, к образованию и разрастанию трещин. Усталостное повреждение материала вначале проявляется в изменении плотности дислокаций и концентрации вакансий, образовании линий скольжения, локальных напряжений, искажении микрогеометрии свободной поверхности образца, изменении плотности. На следующей стадии накопление повреждений оценивают скоростью прорастания микротрещин и уменьшением сопротивления материала статическому нагружению. Свойство материала противостоять усталости называют *выносливостью*.

Испытания на выносливость (ГОСТ 2860) дают характеристики усталостной прочности.

Усталостная прочность – способность материала сопротивляться усталости.

Процесс усталости состоит из трех этапов, соответствующие этим этапам зоны в изломе показаны на рис.1.15.

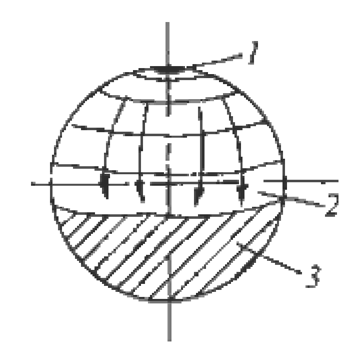


Рис 1.15. Схема зарождения и развития трещины при переменном изгибе круглого образца: 1 – образование трещины в наиболее нагруженной части сечения, которая подвергалась микродеформациям и получила максимальное упрочнение; 2 – постепенное распространение трещины, гладкая притертая поверхность; 3 – окончательное разрушение, зона “долома“, живое сечение уменьшается, а истинное напряжение увеличивается, пока не происходит разрушение хрупкое или вязкое

Характеристики усталостной прочности определяются при циклических испытаниях “изгиб при вращении“. Схема представлена на рис. 1.16.

Основные характеристики:

Предел выносливости (σ_{-1} – при симметричном изменении нагрузки, σ_R – при несимметричном изменении нагрузки) – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за произвольно большое число циклов нагружения N.

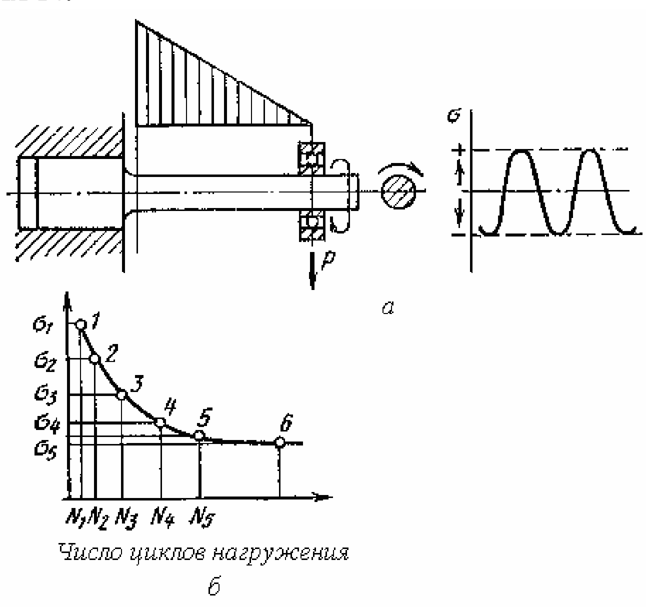


Рис. 1.16. Испытания на усталость (а), кривая усталости (б)

Ограниченный предел выносливости – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за определенное число циклов нагружения или время.

Живучесть – разность между числом циклов до полного разрушения и числом циклов до появления усталостной трещины.

Триботехнические характеристики материалов

Триботехнические характеристики материалов содержат информацию об эффективности их применения в узлах трения. До недавнего времени специалисты машиностроения не относили эти характеристики к числу основных механических характеристик материалов. С 50 - х годов прошлого столетия проблемы триботехники, под которой понимают совокупность технических средств, обеспечивающих оптимальное функционирование узлов трения, считают одними из важнейших в машиностроении, и особенно, в приборостроении.

Основные термины триботехники. *Внешнее трение* – сопротивление относительному перемещению двух соприкасающихся тел в плоскости их касания, сопровождаемому расходованием энергии. *Изнашивание* – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в изменении размеров и формы тела. *Износ* – результат изнашивания. *Смазывание* – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания.

Основные триботехнические характеристики материалов – износостойкость, прирабатываемость и коэффициент трения.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Значение износа выражают в единицах длины, объема или массы. Отношение значения износа U к интервалу времени τ, в течение которого он возник, представляет собой скорость изнашивания $V = U/\tau$. На графике зависимости износа от времени изнашивания (рис. 1.17) можно выделить три участка, соответствующие трем стадиям изнашивания: I – начальное изнашивание, наблюдаемое в процессе приработки узлов трения; II – установившееся (нормальное) изнашивание, для которого характерна небольшая и постоянная скорость изнашивания; III – резкое возрастание скорости изнашивания (катастрофическое изнашивание).

Прирабатываемость – свойство материала уменьшать силу трения, температуру и интенсивность изнашивания в процессе приработки. *Коэффициент трения* – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу. Значения коэффициентов

трения для некоторых пар материалов приведены в приложении.

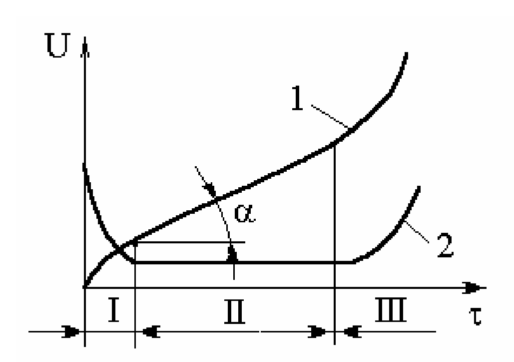


Рис. 1.17. Изменение износа U (1) и скорости изнашивания V (2) во времени τ

1.2.2. Сопротивление материалов коррозии

Коррозия - физико-химический процесс изменения свойств, повреждения и разрушения материалов вследствие перехода их компонентов в соединения с компонентами среды. Под коррозионным повреждением понимают любой дефект структуры материала, возникающий в результате коррозии.

Коррозия в зависимости от характера окружающей среды может быть химической и электрохимической. *Электрохимическая* коррозия имеет место в водных растворах, а так же в обыкновенной атмосфере, где имеется влага. Сущность этой коррозии в том, что ионы металла на поверхности детали, имея малую связь с глубинными ионами, легко отрываются от металла молекулами воды.

Металл, потеряв часть положительно заряженных частиц, ионов, заряжается отрицательно за счет избыточного количества оставшихся электронов. Одновременно слой воды, прилегающий к металлу, за счет ионов металла приобретает положительный заряд. Разность зарядов на границе металл – вода обуславливает скачок потенциала, который в процессе коррозии изменяется, увеличиваясь от растворения металла, и уменьшаясь от осаждения ионов из раствора на металле.

Если количество ионов переходящих в раствор и осаждающихся на металле одинаково, то скорости растворения и осаждения металла равны и процесс коррозии (разрушения металла) не происходит. Этому соответствует равновесный потенциал φ.

За нулевой потенциал принимают равновесный потенциал водородного иона в водном растворе при концентрации положительных ионов водорода, равной 1 моль ионов H + на 1 литр.

Стандартные потенциалы других элементов измерены по отноше-

нию к водородному потенциалу приведены в табл.1.6.

Таблица 1.6

Стандартные потенциалы элементов

Элемент	Потенциал
Mg	–1,55 В
Al	-1,3 В
Zn	-0,76 В
Cr	-0,5 В
Fe	-0,44 В
Ni	-0,23 В
H	±0.00 В
Cu	+0,34 В
Ag	+0,8 В
Au	+1,5 В

Металлы, стандартный потенциал которых отрицательный – корродируют в воде, в которой растворен кислород тем активнее, чем отрицательней значение электрохимического потенциала.

Уходящие ионы металла, взаимодействуя с ионами OH^-, образуют гидроксиды, нерастворимые в воде, которые называют *ржавчиной*, а процесс их образования – *ржавлением*.

Схема ржавления железа:

$$2Fe - 4e \rightarrow 2Fe^{2+};$$

$$2Fe^{2+} + 4OH^- \rightarrow 2Fe(OH)_2$$

Гидроксид железа $Fe(OH)_2$в присутствии кислорода, растворенного в воде, превращается в $Fe(OH)_3$. Так как это нерастворимое соединение, то равновесный потенциал не может быть достигнут, и коррозия будет продолжаться до полного разрушения.

В зависимости от структуры коррозия имеет разное проявление: при однородном металле – коррозия происходит равномерно по всей поверхности. При неоднородном металле – коррозия избирательная и называется точечной. Это явление наиболее опасно, так как приводит к быстрой порче всего изделия. Избирательная коррозия создает очаги концентрации напряжений, что содействует разрушению.

Химическая коррозия может происходить за счет взаимодействия металла с газовой средой при отсутствии влаги. Продуктом коррозии являются оксиды металла. Образуется пленка на поверхности металла толщиной в 1…2 периода кристаллической решетки. Этот слой изоли-

рует металл от кислорода и препятствует дальнейшему окислению, защищает от электрохимической коррозии в воде. При создании коррозионно-стойких сплавов – сплав должен иметь повышенное значение электрохимического потенциала и быть по возможности однофазным.

Если механические воздействия ускоряют коррозию металлов, а коррозия облегчает их механическое разрушение, то имеет место коррозионно-механическое повреждение материалов. Сопротивление материалов коррозии характеризуют с помощью параметра *коррозионной стойкости* – величины, обратной технической скорости коррозии материала в данной коррозионной системе. Для выбора материала по результатам коррозионных испытаний необходимо определить техническую скорость коррозии – ее наибольшую скорость, риском превышения которой нельзя пренебречь в данных условиях [10].

1.2.3. Теплофизические характеристики материалов

Параметры, отражающие изменение свойств материалов в зависимости от их температуры, являются одними из важнейших характеристик материалов. Так прецизионные (высокоточные) гироскопические приборы [1], работающие при температурных колебаниях, могут быть получены только из материалов, имеющих малый и близкий по значению коэффициент температурного линейного расширения. В противном случае произойдет разбалансировка подвижных частей и, как следствие, потеря точности. Для нормальной работы электронных устройств необходимо отводить тепло от теплонапряженных элементов (полупроводниковых интегральных микросхем, транзисторов, микросборок и др.).

Основными теплофизическими параметрами материалов являются жаростойкость, жаропрочность, хладноломкость, тепловое расширение, теплоемкость, теплопроводность.

Жаростойкость

Жаростойкость **–** свойство материалов, заключающееся в том, что механические параметры сохраняются или лишь незначительно изменяются при высоких температурах.

В качестве характеристики жаростойкости легкоплавких материалов используют температуру размягчения. Для пластмасс ее определяют по способу Мартенса (ГОСТ 21341 – 75) как температуру, при которой образец, нагреваемый с установленной скоростью, под действием постоянного изгибающего момента деформируется на заданную величину. Для легкоплавких кристаллических материалов, подобных

воскам, характеристикой жаростойкости является температура плавления.

Характеристикой для газов (паров) является температура вспышки – температура, при которой пары жидкости образуют смесь с воздухом, вспыхивающую при контакте с источником зажигания, например, с газовой горелкой. Температура, при которой материал воспламеняется и после удаления газовой горелки продолжает гореть не менее 5 с, считают температурой вспышки.

Жаропрочность

Жаропрочность – свойство материалов длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при высоких температурах. Характеристика важна для материалов, эксплуатируемых при $T > 0,3\ T_{пл}$ ($T_{пл}$ - температура плавления). Такие условия имеют место в двигателях внутреннего сгорания, паросиловых установках, металлургических печах и т.д. В результате длительного нагружения при высоких температурах в материалах развиваются процессы ползучести (рис. 1.18). При повышении температуры в образцах с одинаковыми напряжениями заметно сокращается продолжительность стадии с установившейся ползучестью BC и ускоряется разрушение (D).

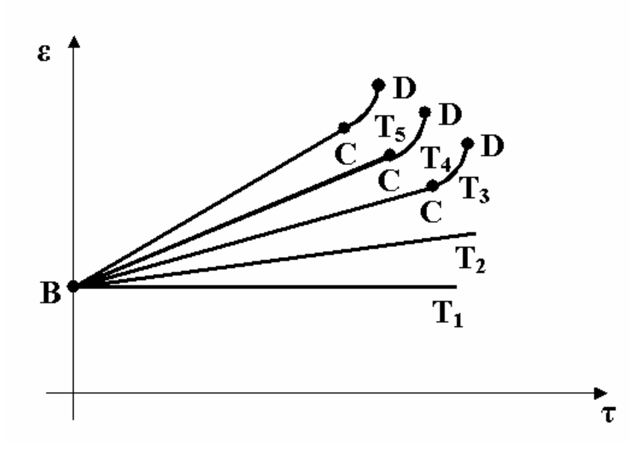


Рис. 1.18. Зависимость ползучести параметров от температуры при постоянном напряжении τ. $T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$

Хладноломкость – возрастные хрупкости материалов при понижении температуры. Склонность материала к хрупкому разрушению определяют по результатам ударных испытаний образцов с надрезом при понижении температуры.

На рис. 1. 19 видно, что при температурах ниже $T_в$ (граничное значение температуры вязкого разрушения) наступает переход от вязкого разрушения к хрупкому и наблюдается резкое снижение ударной вязко-

сти образцов. При температуре $Т_н$ КСТ = 0, т.е. для разрушения образцов не требуется энергии удара. $Т \geq Т_в$ - граница вязкого разрушения - структура излома волокнистая, матовая.

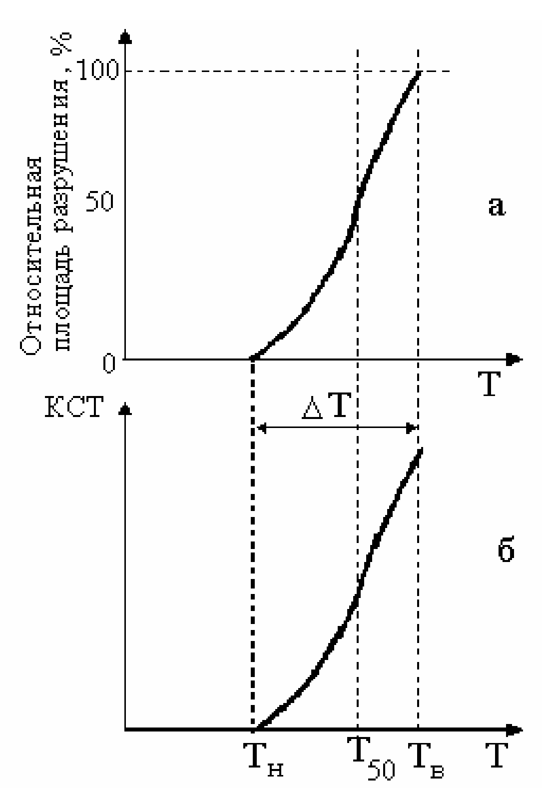


Рис. 1.19. Зависимость относительной площади вязкого разрушения в изломе образцов (а) ударной вязкости (КСТ) материала (б) от температуры: ΔТ – порог хладноломкости; КСТ – коэффициент ударной вязкости; W – работа развития трещины

Порог хладноломкости - интервал температур $\Delta Т = Т_в - Т_н$, в котором происходит переход от вязкого разрушения к хрупкому разрушению образцов. Иногда его характеризуют температурой $Т_{50}$, при которой величина КСТ снижается наполовину, а в изломе образцов наблюдается равенство площадей, соответствующих хрупкому и вязкому разрушению.

Тепловое расширение материалов

Тепловое расширение материалов регистрируют по изменению размеров и формы образцов при изменении температуры. У газов оно обусловлено увеличением кинетической энергии частиц при нагревании, у жидкостей и твердых материалов связано с несимметричностью тепловых колебаний атомов, благодаря чему межатомные расстояния с ростом температуры увеличиваются.

Количественно тепловое расширение материалов характеризуют *температурным коэффициент объемного расширения*

$$\alpha_V = \frac{1}{V}\left(\frac{\Delta V}{\Delta T}\right)_\xi,$$

а твердых материалов и *температурным коэффициентом линейного расширения* (ТКЛР)

$$\alpha_l = \frac{1}{l}\left(\frac{\Delta l}{\Delta T}\right)_\xi,$$

где ΔV, Δl, ΔT изменения линейного размера и температуры. Индекс ξ обозначает условия теплового расширения (обычно – при постоянном давлении). Значения ТКЛР (α) [7] для некоторых материалов для интервала температур 0…100 °C приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Значения ТКЛР (α) для некоторых материалов

Материал	$\alpha \times 10^{-6}$ К$^{-1}$	Материал	$\alpha \times 10^{-6}$ К$^{-1}$
Алмаз	1,3	Нихром	18
Инвар	1,5	Латунь	18,4
Фарфор	3,0	Алюминий	23,8
Платина	9,0	Полистирол	75
Сталь	11,7	Полиэтилен	200
Никель	13,0	Стекло	8,1
Золото	14,2	Платино– иридиевый сплав	8,3

Важность учета ТКЛР можно уяснить на следующем примере. При изготовлении гермовводов, применяемых для передачи электроэнергии на границе двух сред (воздух – вакуум) очень важно обеспечить герметичность. Если взять в качестве материала токопроводящего стержня, например, алюминий, то при остывании расплавленного стекла в форме при изготовлении гермоввода (рис. 1. 20) в нем могут возникать трещины, которые станут каналом разгерметизации. Для исключения брака при производстве гермовводов необходимо подобрать материалы с близким ТКЛР. Наиболее близким стеклу по ТКЛР материалом является платиноиридиевый сплав. Следует иметь ввиду, что не все марки стекол имеют ТКЛР близкий к ТКЛР платиноиридиевых сплавов. На практике для изготовления герметичных токовводов применяют стекло СЧ9 – 2 и сплав 29НК (Н29К18 ковар).

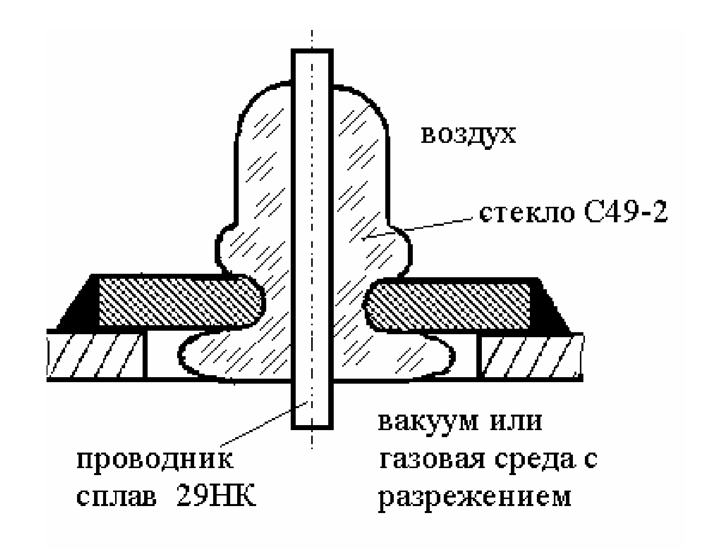


Рис. 1.20. Гермоввод

Теплоемкость

Теплоемкость – отношение количества теплоты Q, полученной телом при бесконечно малом изменении его состояния в каком – либо процессе, к вызванному последним приращению температуры.

$$C = \frac{dQ}{dt}.$$

Удельная теплоемкость - отношение теплоемкости к массе

Теплопроводность

Теплопроводность – перенос энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц. Значения теплопроводности λ для некоторых материалов [7] приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Значения теплопроводности λ для некоторых материалов

Материал	Теплопроводность λ, $Вт/(м \cdot К)$	Материал	Теплопроводность λ, $Вт/(м \cdot К)$
Хорошие проводники тепла		Плохие проводники тепла	
Серебро	407	Стекло	0,7
Медь	384	Вода	0,58
Золото	308	Теплоизоляторы	
Алюминий	209	Асбест	0,4 - 0,8

Материал	Теплопровод-ность λ, $Вт/(м \cdot К)$	Материал	Теплопровод-ность λ, $Вт/(м \cdot К)$
Латунь	111	ПВХ	0,17
Платина	70	Кожа	0,15
Сталь	47	Дерево	0,1 – 0,2
Свинец	35	Пробка	0,05
Плохие проводники тепла		Стекловата	0,05
Ртуть	8,2	Пенопласт	0,04
Мрамор	2,8	Воздух	0,034
Лед (0 ^{0}С)	2,23	Перо	0,02
Бетон	0,7 – 1,2	Вакуум	0,00

1.2.4. Электрические свойства материалов

В электротехнических и электронных узлах приборов применяют проводниковые, полупроводниковые, электроизоляционные, магнитные и другие материалы. Для эффективного их применения необходима информация о параметрах электрических, магнитных и других специфических свойств.

Электропроводность

Электропроводность – свойство материалов проводить электрический ток, обусловленное наличием в них заряженных частиц - носителей тока. Электрическое сопротивление – свойство материалов как проводников противодействовать электрическому току. Природу электропроводности твердых материалов объясняет зонная теория - квантовая теория энергетического спектра электронов в твердых телах, согласно которой этот спектр состоит из чередующихся зон разрешенных и запрещенных энергий. Согласно этой теории можно выделить три группы материалов: проводники, полупроводники и диэлектрики. У проводников запрещенная зона отсутствует, у полупроводников она не превышает 3,5 В, у диэлектриков она составляет десятки киловольт.

Электрическое сопротивление материалов характеризуют *удельным электрическим сопротивлением*

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}; \quad Ом \cdot м \text{ или } \frac{Ом \cdot мм^2}{м},$$

где R – электрическое сопротивление; S – площадь поперечного сечения образца; l – длинна образца.

Удельное электрическое сопротивление проводников и непроводников зависит от температуры. Сопротивление металлических проводников увеличивается с повышением температуры. У полупроводников сопротивление сильно уменьшается при повышении температуры.

У некоторых материалов при температуре, близкой к абсолютному нулю, сопротивление скачком уменьшается до нуля (явление сверхпроводимости). Сопротивление константана (60%Cu, 40%Ni) и манганина (86%Cu, 2%Ni, 12%Mn) очень слабо зависит от температуры.

$$\rho_t = \rho_{20}\left[1+\alpha\left(t-20^\circ C\right)\right],$$

где: ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление при t= 20°C,
ρ_t – удельное электрическое сопротивление при температуре t,
α – температурный коэффициент электрического сопротивления.

Пробой диэлектрика

Любой диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойство электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектрика или нарушения его электрической прочности.

Значение напряжения, при котором проходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – пробивной напряженностью $E_{пр}$ и измеряется чаще всего в киловольтах. Пробивная напряженность определяется величиной пробивного напряжения, отнесенного к толщине диэлектрика в месте пробоя $E_{пр} = U_{пр}/h$, кВ/ мм, где h толщина диэлектрика в мм.

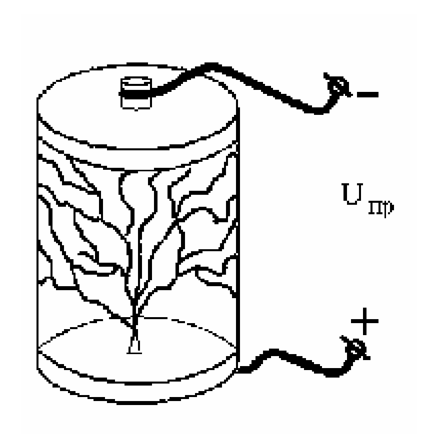


Рис. 1.21. Каналы проводимости при пробое сплошного цилиндра из оргстекла

Пробой газов обусловливается явлением ударной и фотоионизации. В однородном поле пробой газа наступает внезапно, в неоднородном поле пробою предшествует явление короны. Пробой твердых тел может вызываться как электрическими, так и тепловыми процессами, возникающими под действием поля. Если сплошной цилиндр из оргстекла поместить между двумя соответствующим образом выполненными электродами (рис. 1.21) высоковольтной установки, то

при пробивном напряжении происходит образование каналов проводимости (пробой) в цилиндре.

Для полиметилметакрилата (оргстекло) пробивная напряженность $E_{пр}$ = 15 - 25 кВ/мм.

1.2.5. Магнитные свойства материалов

Намагниченность

Все вещества, помещенные во внешнее магнитное поле, намагничиваются. Характеристикой намагничивания материалов служит намагниченность, равная суммарному магнитному моменту атомов в единице объема материала. Для однородного намагниченного материала намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\vec{M}}{V},$$

где, M – магнитный момент, V – объем образца.

Магнитный момент – векторная величина, характеризующее вещество, как источник магнитного поля. Для одного атома магнитный момент складывается из векторов орбитальных и собственных (спиновых) моментов электронов, принадлежащих атому.

Магнитная восприимчивость $k_m = \frac{J}{H}$, где H – напряженность намагничивающего поля. В зависимости от знака и значение K_m все материалы делятся на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетизм – свойство материалов намагничиваться во внешнем магнитном поле в направлении противоположном полю. Примеры диамагнетиков: Cu, Ag, Hg, Bi. $K_m = -(10^{-6} \dots 10^{-5})$. Они незначительно ослабляют магнитное поле.

Парамагнетики (Pt, воздух, Al) – обладают положительной магнитной восприимчивостью, поле в них лишь незначительно возрастает. $K_m = (10^{-6} \dots 10^{-3})$. Они слабо намагничиваются по направлению магнитного поля, а в отсутствии поля немагнитны.

Ферромагнетики (Fe, Ni, Co, Cr, Mn) – характеризуется большим значение магнитной восприимчивости ($K_m >> 1$) и ее нелинейной зависимостью от напряженности магнитного поля и температуры. Ферромагнетики используются для создания магнитопроводов электрических машин и аппаратов (железо, пермаллой, викаллой, ферриты, электротехнические стали), для изготовления магнитных носителей компьютеров, магнитных экранов, постоянных магнитов.

Схематическое изображение магнитной упорядоченности мате-

риалов приведено на рис.1.22. Основной характеристикой магнитного поля является индукция. *Индукция* **–** результирующее магнитное поле в веществе.

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{J}\right), \qquad \text{Тл}$$

где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{М}$ - магнитная постоянная, $\vec{J}$- намагниченность вещества; $\vec{H}$ - напряженность внешнего магнитного поля.

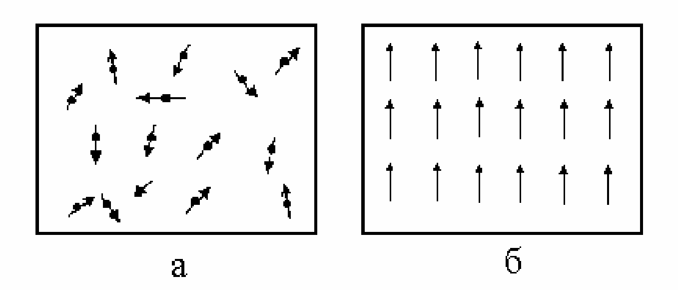


Рис. 1.22. Схема магнитного упорядочивания атомов:
а - в парамагнетиках, б - в ферромагнетиках

Намагничивание ферромагнетика

При намагничивании ферромагнетика в изменяющемся магнитном поле обнаруживается гистерезис – неоднозначная зависимость намагниченности от изменения напряженности магнитного поля. Кривая намагничивания ферромагнетика представляет собой петлю гистерезиса (рис.1.23).

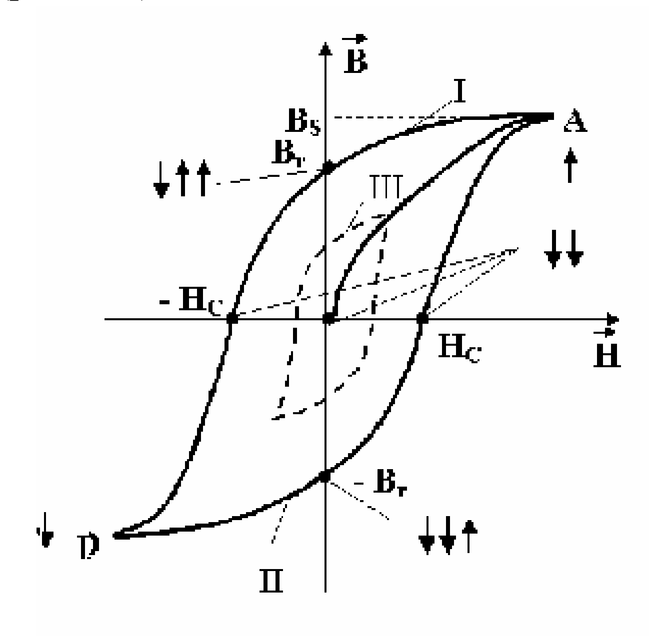


Рис. 1.23. Кривая намагничивания ферромагнетика:
B_S – индукция насыщения; H_C – коэрцитивная сила; точка A– индукция насыщения; точка D – отрицательная индукция насыщения; B_r – остаточная индукция

В точном приборостроении стальные детали приборов перед сборкой подвергают размагничиванию. Намагниченность детали возникает в процессе механической обработки, особенно, когда установка деталей осуществлялась в магнитных приспособлениях. Намагниченность создает дополнительные вредные моменты в подвижных системах приборов, а также возникает опасность попадания в прибор мельчайшей металлической пыли, удалить которую становится практически невозможно.

Для размагничивания используются секционированные индукционные катушки, имеющие небольшую индуктивность. Детали помещают внутрь катушки на диэлектрической подставке. Секции обмотки катушки, имеющие самостоятельные выводы, подключаются параллельно в сеть переменного тока промышленной частоты. Путем измерения величины тока в катушке в размагничиваемой детали создается переменное магнитное поле, соответствующее магнитному насыщению детали. При последующем уменьшении величины тока до нуля происходит размагничивание детали.

В приборостроении, автоматике, проводной связи, радио применяются магнитомягкие материалы в области слабого тока. В области низких и повышенных частот применяют преимущественно ферромагнитные сплавы, а в области высоких частот и для импульсной техники с ними успешно конкурируют ферриты.

Магнитомягкие материалы – материалы и сплавы, обладающие малой коэрцитивной силой H_C (рис. 1.24, а).

К этой группе материалов относятся чистое железо (С < 0,04%), электротехнические стали, железоникелевые сплавы (пермаллои) и др. Из этих материалов делают магнитопроводы: сердечники для трансформаторов, пакеты роторов и статоров электрических машин.

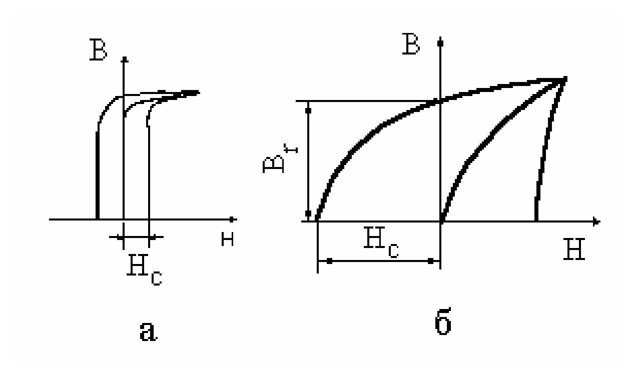


Рис. 1.24. Кривые намагничивания ферромагнитных материалов: а – магнитомягких; б – магнитотвёрдых

Магнитотвёрдые сплавы – большая коэрцитивная H_c сила и высокая остаточная индукция B_r (рис. 1.21, б). Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, магнитных лент и дисков для записи информации и др.

Наибольшее промышленное применение для постоянных магнитов [9] имеют литые и металлокерамические сплавы на основе системы Al – Ni – Co. В качестве примера можно привести сплав ЮН13Д24К (Al ≈ 1%; Ni ≈ 13%; Cu ≈ 24%; Co ≈ 1%; остальное Fe).

Современный этап развития магнитотвёрдых материалов характеризуется двумя особенностями: началом широкого применения магнитов из редкоземельных материалов класса $R\,Co_5$ (где R – редкоземельный элемент - РЗМ, например Sm, Pr и т.п.) и открытие возможности дальнейшего существенного увеличения удельной энергии магнитов из РЗМ путем перехода к соединениям класса $R_2(Co, Fe)_{17}$ и некоторым другим.

РЗМ класса $R\,Co_5$, обладающих очень высокой коэрцитивной силой и удельной энергией, вдвое большей, чем у альнико лучших марок, но они дороже.

1.2.6. Технологические свойства материалов

Технологические свойства материалов характеризуют податливость материалов различным методам обработки при переработке в изделие. Знание этих свойств позволяет рационально проектировать и осуществлять технологические процессы изготовления изделий. Основными технологическими характеристиками материалов являются: обрабатываемость резанием, давлением, литьем, свариваемость, склонность к деформации и короблению при термической обработке и др.

Обрабатываемость резанием характеризуют следующими показателями: качеством обработки материалов – шероховатостью обработанной поверхности и точностью размеров детали, стойкостью инструмента, сопротивлением резанию – скоростью резания и силой резания, видом стружкообразования. Значения показателей определяют при обтачивании образцов и сравнивают с параметрами материала, принятого за эталон.

Обрабатываемость давлением – податливость материалов подвергаться обработке штамповкой, ковкой, волочением и т.д. Обрабатываемость давлением определяют в процессе технологических испытаний (проб) материалов на пластическую деформацию. Методы оценки обрабатываемости давлением зависят от вида материалов и технологии переработки.

Литейные характеристики материалов – совокупность технологических показателей, характеризующих формирование отливок путем заливки расплавленных материалов в литейную форму. Жидкотекучесть – свойство расплавленного металла заполнять литейную форму. Зависит от вязкости расплава, температуры расплава и формы, степени смачивания расплавом стенок формы и т.д. Усадка литейная – уменьшение объема расплава при переходе из жидкого состояния в твердое.

Свариваемость – свойство материала образовывать сварное соединение, работоспособность которого соответствует качеству основного материала, подвергаемого сварке. О свариваемости судят по результатам испытания сварных образцов и характеристикам основного материала в зоне сварного шва.

Технологические свойства материалов, подвергаемых тепловой обработке и воздействию электромагнитного поля специфичны для материалов разных классов и рассмотрены при их описании.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие диаграмм растяжения пластичных и хрупких материалов?
2. Объясните явление наклёпа в структуре металлических материалов? При каких условиях возникает наклёп и к изменению каких свойств приводит?
3. Дайте определение твердости материала. Для каких структур материала деталей требуется высокая твердость?
4. Какой из методов определения твердости позволяет по найденному значению твердости определить предел прочности материала?
5. Сущность и область применения метода Виккерса.
6. Существует ли соотношение между значениями твердости, полученными по методам Роквелла, Бринелля и Виккерса?
7. В чём отличие двух методов определения твёрдости материалов по Шору.
8. Область применения метода определения твердости по Шору по упругому отскоку бойка.
9. Область применения метода определения твердости по Шору по вдавливанию индентора.
10. Для каких деталей приборов и машин важно знать динамическую прочность материала?
11. С помощью каких установок определяется ударная вязкость материалов?

12.При каких нагрузках и как происходит усталостное разрушение материала?
13. Назовите основные триботехнические характеристики материалов. Для каких узлов приборов и машин важно учитывать эти характеристики и почему?
14. Как изменяется прочность материала с повышением температуры?
15. Как экспериментально определить склонность материала к хладноломкости?
16. Приведите примеры деталей и узлов приборов, при выборе материалов которых обязательно нужно учитывать тепловое расширение.
17. Приведите примеры материалов с высокой и низкой теплопроводностью.
18. Как можно классифицировать проводниковые материалы?
19. Почему удельное сопротивление материалов растет с повышением температуры?
20.Что называют температурным коэффициентом удельного сопротивления? Является ли он константой для данного материала?
21. Как классифицируются материалы по магнитным свойствам?
22. Какие процессы происходят в ферромагнетике при его намагничивании внешним магнитным полем? Что называют основной кривой намагничивания ферромагнитного материала?
23. Каковы причины появления магнитных потерь при циклическом перемагничивании ферромагнетиков? Какие способы уменьшения магнитных потерь Вам известны?
24. Какие материалы называются ферритом?
25. В чем отличие между магнитомягкими и магнитотвердыми веществами? Приведите примеры электромеханических узлов, в которых применяются эти материалы.
26. Назовите важнейшие характеристики магнитотвердых материалов.

1.3. Строение и свойства материалов

1.3.1. Кристаллическое строение металлов

Металлы являются телами кристаллическими. Кристаллическое состояние характеризуется закономерным (упорядоченным) расположением атомов в пространстве. Рассмотрим элементарную ячейку кристаллической решетки (рис. 1.25). Элементарная ячейка показана штриховкой. Расстояние между узлами 0,1…..0,7 нм. Частота колебаний ионов атомов в узлах кристаллической решетки - 10^{13} Гц.

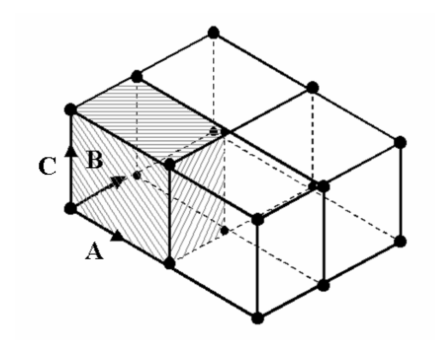
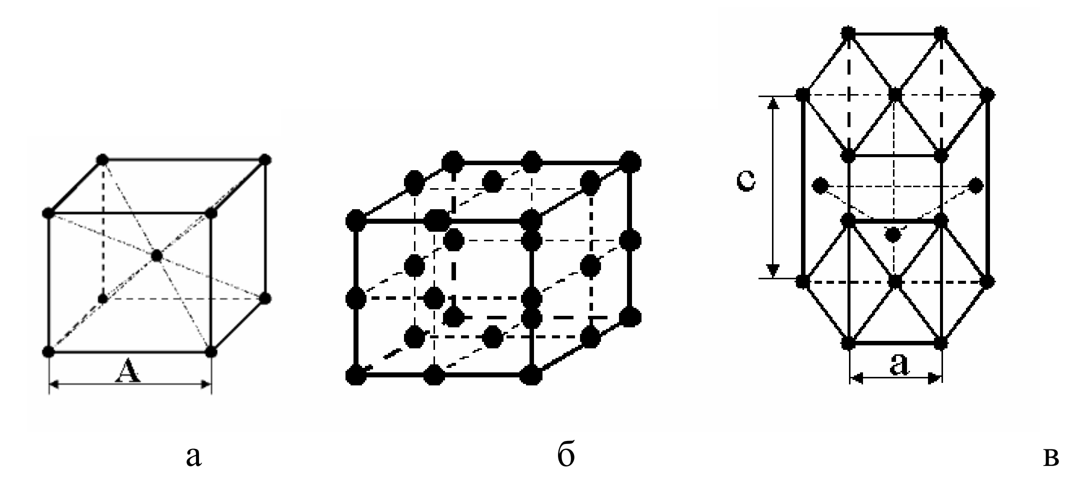


Рис. 1.25. Схема кристаллической решетки A, B, C – периоды кристаллической решетки

1.3.2. Элементарные кристаллические решетки материалов

Объемно – центрированная кубическая (ОЦК) решетка (рис. 1.26, а).

В ней ионы атомов находятся в вершинах и центре куба. Такую решетку имеют следующие элементы: K, Na, Li, Ta, W, V, Cr, Nв, Ba, Fe_{α} и другие.



а б в

Рис. 1. 26. Основные типы кристаллических решеток материалов: а – ОЦК, б – ГЦК, в - ГПУ

Гранецентрированная кубическая (ГЦК) решетка (рис.1.26,б)

В такой решетке ионы атомов расположены не только в вершинах куба, но и в центре каждой грани. Она характерна для Rb, Ce, Fe_{γ}, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Cu, Jr и др.

Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) решетка (рис. 1.26, в). Частицы в такой решетке расположены очень плотно. Такая ячейка характерна для Mg, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Be и др.

1.3.3. Энергия взаимодействия соседних атомов

В твердом состоянии металл представляет собой постройку, состоящую из положительно заряженных ионов, омываемых “газом” из свободных коллективизированных электронов. Между ионами и коллективизированными электронами проводимости возникают электростатические напряжения, которые стягивают ионы. Такая связь называется металлической. Атомы (ионы) располагаются в кристаллической решетке на таком расстоянии a_0 друг от друга (рис. 1.27), при котором энергия взаимодействия минимальна.

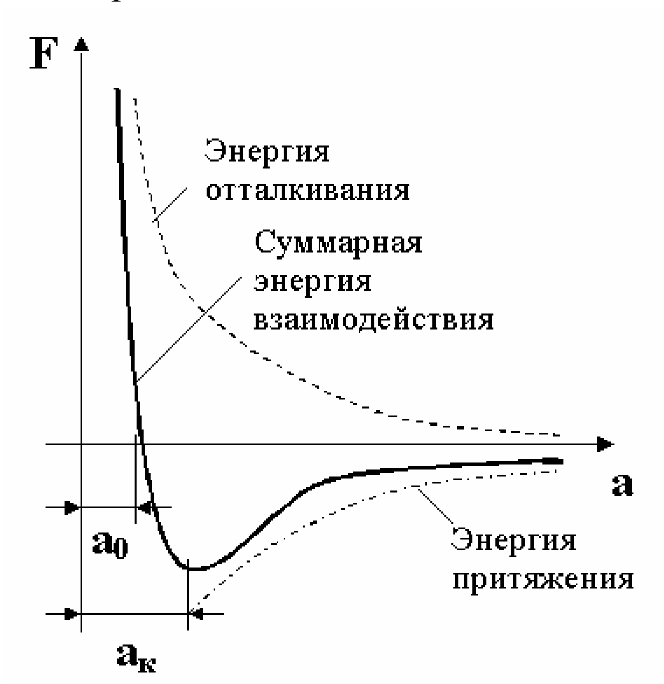


Рис. 1.27. Схема энергии взаимодействия двух атомов в зависимости от межатомного расстояния

Проследим зависимость энергии взаимных атомов от расстояния. Сближение атомов (ионов) на расстояние, меньшее a_0, или удаление их на расстояние, большее a_0, осуществимо лишь при совершении определенной работы против сил отталкивания и притяжения. При $a = a_к$ сила притяжения между атомами максимальна ($a_к$ – критические расстояние, после увеличения которого, происходит разрушение решетки)

1.3.4. Дефекты кристаллической решетки металлов

В любом реальном кристалле всегда имеются дефекты строения. Дефекты кристаллического строения подразделяют на точечные, линейные (одномерные) и поверхностные (двухмерные).

Точечные дефекты. Эти дефекты малы во всех трех измерениях, и размеры их не превышают нескольких атомных диаметров. К точечным дефектам относятся: *вакансии* (рис. 1.28, а) (дефекты Шотки), т.е. узлы решетки, в которых атомы отсутствуют; межузельные атомы (дефекты Френкеля, образующиеся в результате перехода атома из узла решетки в междоузлие). На месте атома, вышедшего из узла решетки в междоузлие, образуется дислоцированный атом (рис. 1.28, б).

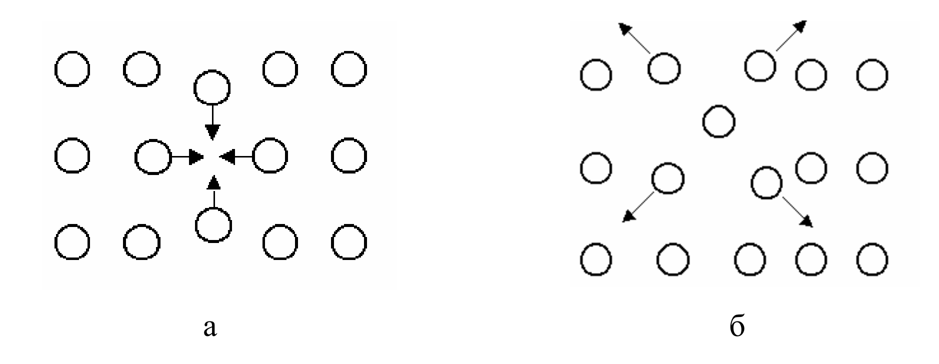


Рис. 1.28. Точечные дефекты в кристаллической решетке: а – вакансия, б - междоузельный атом

Точечные дефекты вызывают незначительные искажения решетки, что может привести к изменению свойств тела (электропроводность, магнитные свойства), их наличие способствует процессам диффузии и протеканию фазовых превращений в твердом состоянии. При перемещении по материалу дефекты могут взаимодействовать.

К линейным дефектам кристаллического строения металлов относятся дислокации – особый вид несовершенства кристаллической решетки, который образуется в результате локальных необратимых смещений отдельных участков кристалла. Наиболее характерной разностью дислокации является краевая дислокация. На рис.1.29 краевая дислокация представляет собой искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней “лишней” атомной полуплоскости (нижний край лишней полуплоскости АВ), внедрившейся в верхнюю часть кристаллической решетки. Здесь решетка упруго деформирована. В верхней части она шире, чем в нижней, что вызывает соответствующее искажение расстояния между атомами.

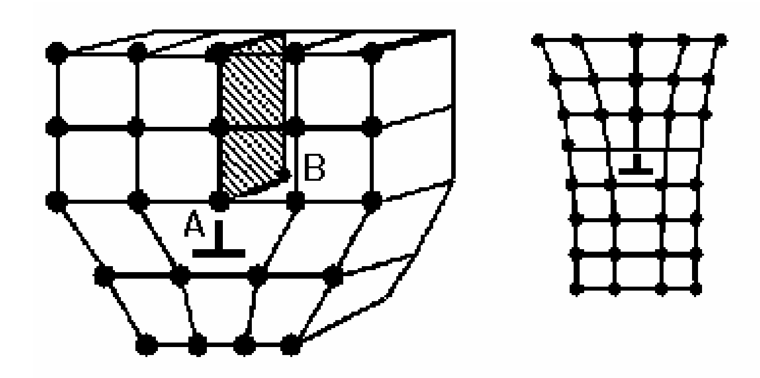


Рис. 1.29. Схема краевой дислокации в кристаллической решетке

Другим видом дислокации является *винтовая дислокация*. Винтовая дислокация формируется под действием сил сдвига Р (рис. 1.30). Сдвиг распространяется от переднего края кристалла до линии АВ. При этом правая передняя часть кристалла смещается вниз на период кристаллической решетки. Такая деформация искажает расстояние между атомами неравномерно.

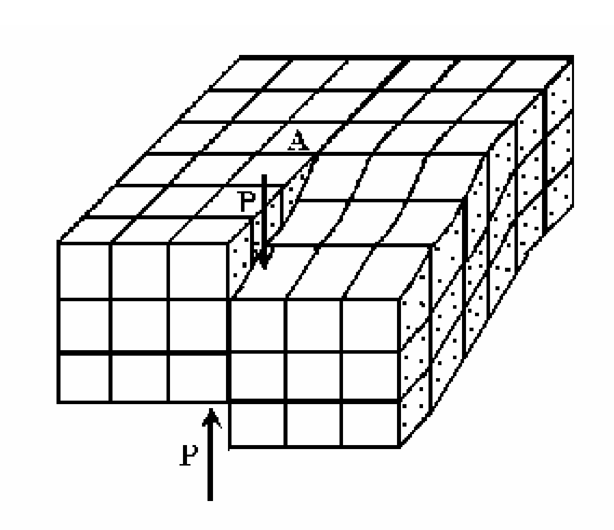


Рис. 1.30. Схема винтовой дислокации

Дислокационная структура материала характеризуется *плотностью дислокаций*.

Плотность дислокаций в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью 1 м^2, или как суммарная длина линий дислокаций в объеме 1 м^3

$$\rho = \frac{\sum l}{V} \text{ (см}^{-2}\text{; м}^{-2}\text{)}$$

Если плотность меньше значения *a,* то сопротивление деформированию резко возрастает, а прочность приближается к теоретической. Повышение прочности достигается созданием металла с бездефектной структурой, а также повышением плотности дислокаций, затрудняющим их движение (рис.1.31). В настоящее время созданы кристаллы без дефектов – нитевидные кристаллы длиной до 2 мм, толщиной 0,5…20 мкм - "усы" с прочностью, близкой к теоретической: для железа $\sigma_в$= 13000 МПа, для меди $\sigma_в$=30000 МПа. При упрочнении металлов увеличением плотности дислокаций, она не должна превышать значений $10^{15}…10^{16}$ м$^{-2}$. В противном случае образуются трещины.



Рис. 1.31. Влияние плотности дислокаций на прочность

Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на другие свойства кристаллов. С увеличением плотности дислокаций возрастает внутреннее, изменяются оптические свойства, повышается электросопротивление металла. Дислокации увеличивают среднюю скорость диффузии в кристалле, ускоряют старение и другие процессы, уменьшают химическую стойкость, поэтому в результате обработки по-

верхности кристалла специальными веществами в местах выхода дислокаций образуются ямки.

Дислокации образуются при образовании кристаллов из расплава или газообразной фазы, при срастании блоков с малыми углами разориентировки. При перемещении вакансий внутри кристалла, они концентрируются, образуя полости в виде дисков. Если такие диски велики, то энергетически выгодно “захлопывание” их с образованием по краю диска краевой дислокации. Образуются дислокации при деформации, в процессе кристаллизации, при термической обработке.

Поверхностные дефекты – границы зерен, фрагментов и блоков (рис. 1.32).

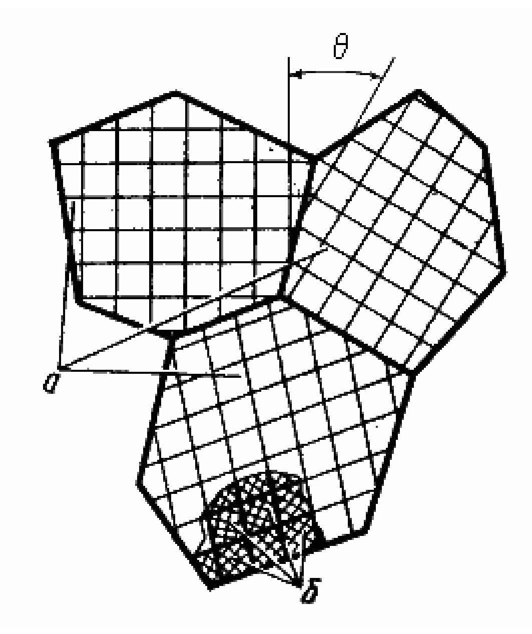


Рис. 1.32. Разориентация зерен и блоков в металле

Размеры зерен составляют до 1000 мкм. Углы разориентации составляют до нескольких десятков градусов (θ).

Граница между зернами представляет собой тонкую в 5 – 10 атомных диаметров поверхностную зону с максимальным нарушением порядка в расположении атомов.

Строение переходного слоя способствует скоплению в нем дислокаций. На границах зерен повышена концентрация примесей, которые понижают поверхностную энергию. Однако и внутри зерна никогда не наблюдается идеального строения кристаллической решетки. Имеются участки, разориентированные один относительно другого на несколько градусов (θ_1). Эти участки называются *фрагментами*. Процесс деления

зерен на фрагменты называется *фрагментацией* или *полигонизацией*.

В свою очередь каждый фрагмент состоит из блоков, размерами менее 10 мкм, разориентированных на угол менее одного градуса (θ_2). Такую структуру называют *блочной или мозаичной.*

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется кристаллическое строение металлов?
2. Какие типы кристаллических решёток Вам известны?
3. Основные дефекты кристаллического строения.
4. Какие механические свойства характеризуют прочность и пластичность материалов при растяжении?
5. **Как влияет плотность дислокаций на прочность и пластичность металлов?**

Глава II. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

Металлы до недавнего времени были основой важнейших конструкционных материалов приборостроения. Их роль и сейчас остается весьма высокой. Уникальный комплекс физико-механических, теплофизических, электрических и магнитных свойств объясняется специфическим строением их кристаллической решетки и наличием большого количества электронов проводимости. Физико-механические характеристики металлов в значительной мере определяются их атомно-кристаллическим строением, которое формируется в процессе кристаллизации расплава. Управляя процессом кристаллизации, можно достичь уникального сочетания характеристик металла. Процесс образования и роста кристаллов характеризуется изменением свободной энергии системы и протекает при определенной для данного металла равновесной температуре кристаллизации.

Для некоторых металлов характерно явление полиморфизма, обусловливающего различие физико-механических, электрических и магнитных свойств разных полиморфных модификаций одного и того же металла. Большинство металлов подвержено коррозии, в результате действия которой происходит их разрушение.

Металлы (греч. metallon – руда, металл) вещества, характеризующихся в нормальных условиях высокой электропроводностью и теплопроводностью, способностью хорошо отражать электромагнитные волны, пластичностью. Согласно современным представлениям, металлы состоят из ионного кристаллического остова, окруженного “электронным газом”, который компенсирует энергию электростатического

отталкивания ионов, связывая их в твердое тело (металлическая связь).

Из известных в настоящее время химических элементов более 80 обладают свойствами металлов.

2.1. Общие сведения о металлах и сплавах

2.1.1. Кристаллизация металлов

Кристаллизация – это фазовый переход вещества из состояния переохлажденной (пересыщенной) маточной среды в кристаллическую фазу с меньшей свободной энергией.

Движущей силой процесса кристаллизации является свободная энергия. Рассмотрим процесс перехода системы в состояние, когда энергия минимальна, на примере механической системы (рис. 2.1). Потенциальная энергия шарика в положении 2 меньше, чем в положении 1. Положение шарика 1 на вершине неустойчиво. Необходимо затратить определенную энергию для поддержания его в этом положении. Положение 2 шарика – устойчивое положение (свободная энергия минимальна).

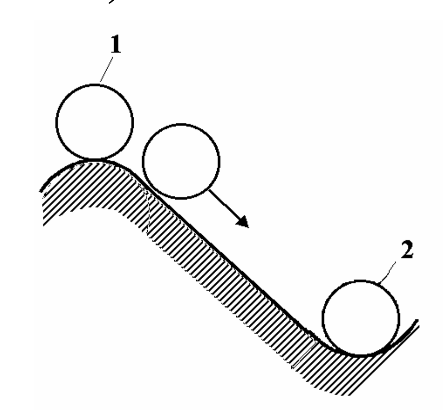


Рис. 2.1. Иллюстрация процесса перехода системы в состояние, при котором ее свободная энергия минимальна

Свободная энергия системы $F = U - T \cdot S$, где: U – внутренняя энергия схемы, T – абсолютная температура, S – энтропия. Изменение энтропии при переходе системы из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T},$$

где: Q – количество теплоты; $\frac{Q}{T}$ - приведенное количество теплоты; ΔS - изменение энтропии. При обратимом процессе $\Delta S = 0$. При необратимом – $\Delta S \geq 0$.

Второй закон термодинамики $\Delta S \geq 0$

Существует температура T_P – температура равновесия (рис. 2.2), при которой значения F (свободной энергии) для металла в жидком и

твердом состоянии одинаковы. Она называется равновесной температурой кристаллизации. При этой температуре в отсутствие внешних воздействий твердое и жидкое состояния вещества могут существовать неограниченное время $F_1 = F_2$ (при T_P).

При $T < T_P$ (рис. 2.2) свободная энергия $F_Ж > F_{ТВ}$, поэтому системе выгоднее быть в твердом состоянии. При $T > T_P$ $F_Ж < F_{ТВ}$, системе выгоднее быть в жидкой фазе. Чтобы начался процесс кристаллизации нужно охладить вещество (рис. 2.3) на $\Delta T_К$. Для плавления кристаллического тела необходим дополнительный нагрев системы до температуры, на $\Delta T_п$ (перегрев) превышающей $T_р$. Разница ΔT между истинными температурами плавления и кристаллизации называется *температурным гистерезисом*. Обычно для начала кристаллизации необходимо переохлаждение на 10…30 К.

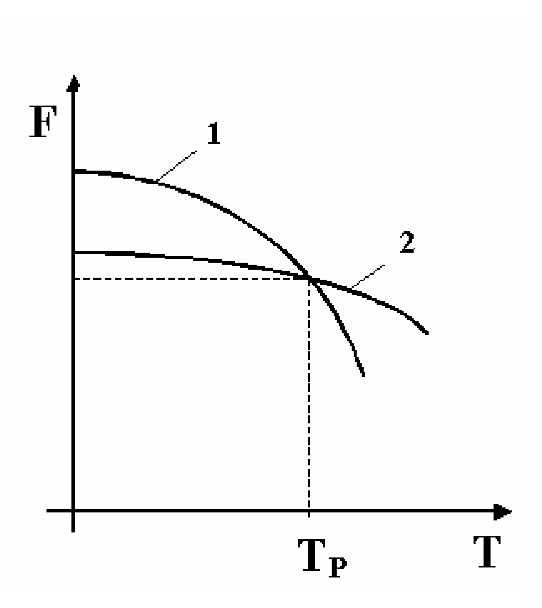


Рис. 2.2. Зависимость свобод ной энергии жидкой 1 и твердой 2 фаз

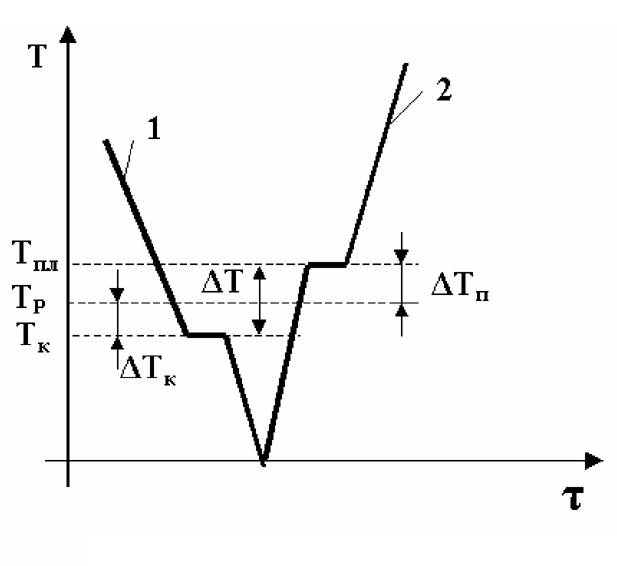


Рис. 2.3. Характерный вид кривых охлаждения (1) и нагрева (2) чистого металла

Русский инженер Чернов Д.К. первым в 1878 году установил, что процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов (рис. 2.4): $V_З$ – скорость роста числа зачатков (центров кристаллизации), $V_Р$ – скорость роста кристаллов.

При малом переохлаждении **(I)** значении: $V_З > V_Р$, металл получается крупнозернистый. При быстром переохлаждении **(II)** значении: $V_З < V_Р$, растет много мелких кристаллов, т.е. структура получается мелкозернистой. Размер реальных зерен колеблется в диапазоне $1 - 10^{-4}$ мм.

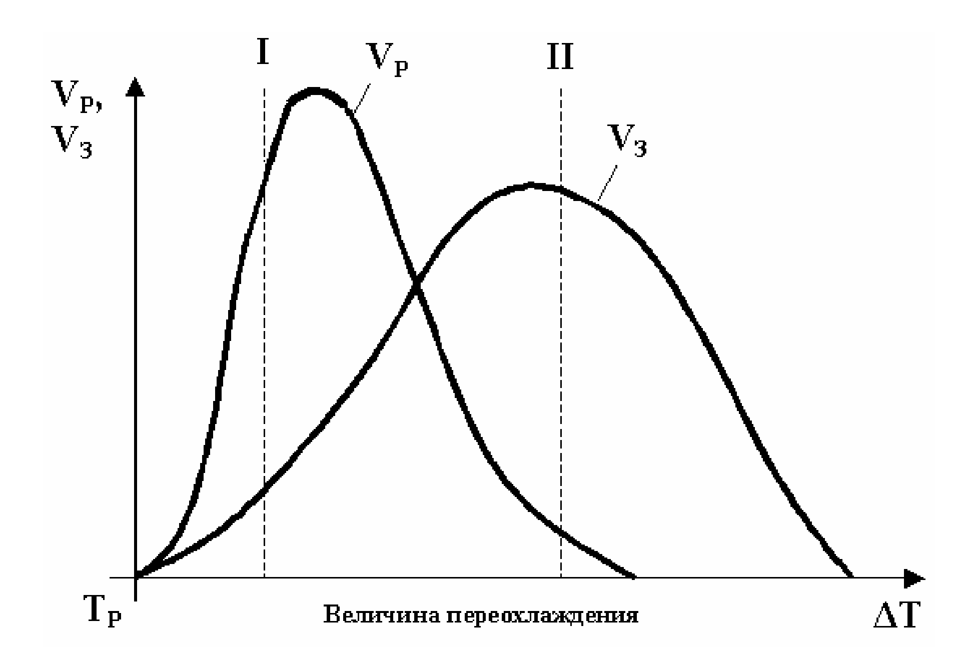


Рис. 2.4. Зависимость скорости роста кристаллов V_p и образования зародышей $V_p, \frac{мм}{мин}$ $V_з, \frac{1}{мм^3 с}$

Этапы процесса кристаллизации (рис. 2.5*):*

1. В твердом состоянии все металлы имеют кристаллическое строение.
2. При переходе из жидкого состояния в твердое в отдельных частях жидкой фазы образуются частички правильно построенных атомов (зародышей).
3. Дальнейший рост кристаллов идет за счет надстройки атомов из жидкой фазы к зародышам.
4. Движущейся силой процесса кристаллизации является свободная энергия системы. Системе выгодно, чтобы свободная энергия была минимальной.
5. Скорость всего процесса кристаллизация определяется двумя величинами: V_P и $V_З$.

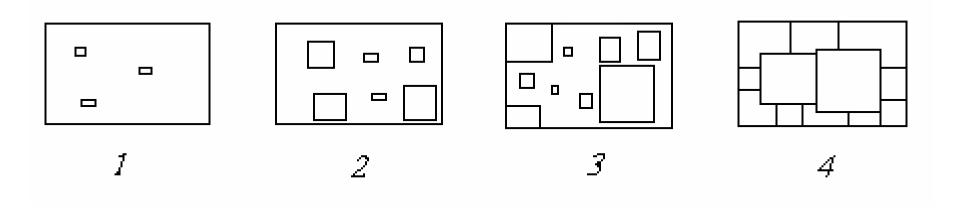


Рис. 2.5. Схема этапов процесса кристаллизации

2.1.2. Строение и свойства сплавов

Сплав – вещество, получаемое сплавлением или спеканием нескольких химических элементов, которые называются *компонентами сплава.* Части сплава, имеющие одинаковый химический состав, кристаллическое строение и свойства и отделенные от других поверхностями раздела, называют *фазами.*Сплавы, состоящие из зерен одной фазы, называют *однофазными.* Сплавы, состоящие из двух и более фаз – *многофазными.* Совокупность находящихся в равновесии фаз принято называть *системой сплава.*

Диаграмма состояния сплавов

Диаграммой состояния сплавов называют графическое изображение состояния сплава в координатах концентрация – температура (рис. 2.6).

Эта диаграмма представляет собой теоретический случай, а на практике используется при малых скоростях нагрева и охлаждения.

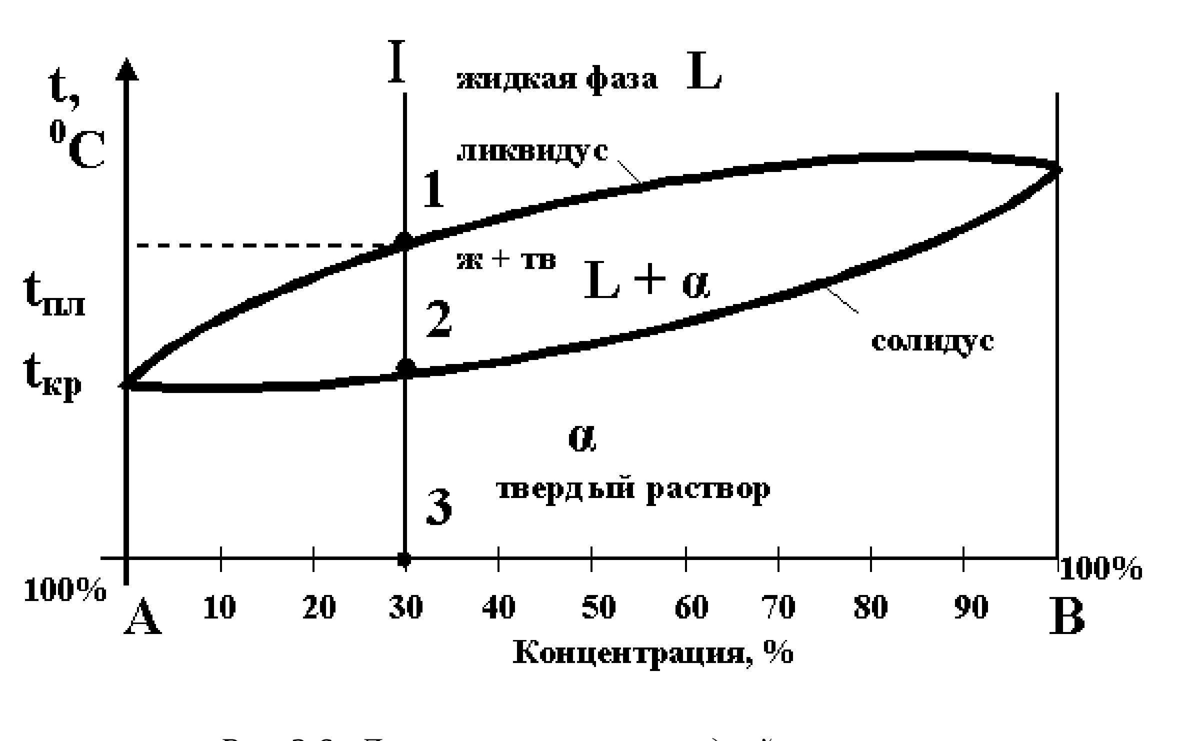


Рис. 2.6. Диаграммы состояния двойного сплава

В точке **А** имеем 100% компонента А и 0% компонента В. В точке **В** 100% компонента В и 0% компонента А. Для сплава **I** 30% В и 70% А. По краям характеристики чистые материалы.

На линии ликвидус (точка 1) начинается процесс кристаллизации. В интервале температур от точки 1 до точки 2 идет процесс кристаллизации, т.е. имеет место как жидкая L, так и твердая α фазы. Ниже ли-

нии солидус (точка 2) жидкая фаза полностью исчерпывается, сплав находится в твердом состоянии и охлаждается до температуры окружающей среды, в точке 3.

2.1.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих непрерывный ряд твердых растворов

Пример построения диаграммы состояния сплавов приведен на рис. 4.7. Сначала необходимо определить экспериментальным путем температуры начала и конца кристаллизации (рис. 2.7, а) и построить кривые охлаждения чистых металлов I, V и сплавов II, III, IV. Далее значение этих температур откладываются на диаграмме состояния для сплавов II, III, IV с соответствующей концентрацией (рис. 2.7, б).

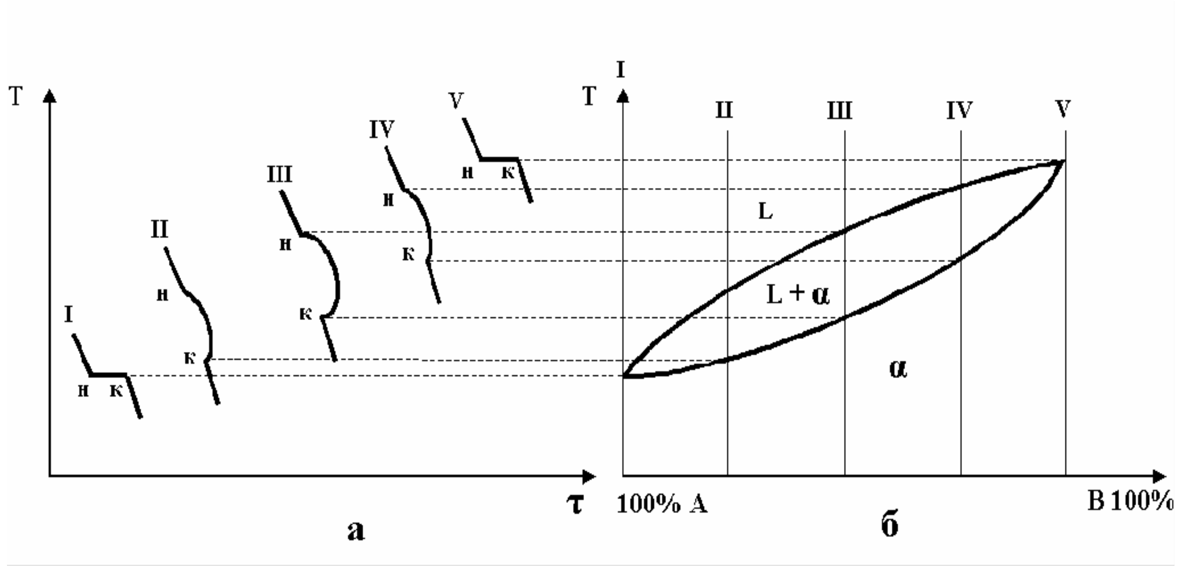


Рис. 2.7. Пример построения диаграммы состояния сплавов, образующих непрерывный ряд твердых растворов: а – кривые охлаждения сплавов (II, II, IV) и чистых металлов (I, V); б – диаграмма состояния сплава. Н – начало кристаллизации, К – конец кристаллизации

Твердые растворы

При образовании твердого раствора атомы растворимого компонента размещаются в кристаллической решетке компонента – растворителя. *Твердые растворы замещения.* Пример. $Co \to Ni$ (рис. 2.8). Co – растворимое вещество, *Ni* – *растворитель.*

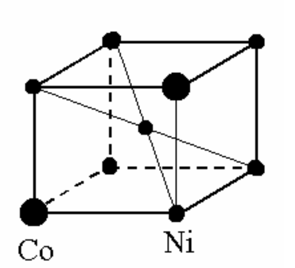


Рис. 2.8. Твердый раствор замещения $Co \to Ni$

Твердые растворы внедрения (рис. 2.9): C +Fe_{α} (феррит); C и Fe_{γ} (аустенит). C – растворимое вещество. Fe – растворитель

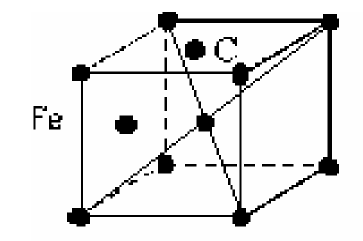


Рис. 2.9. Твердый раствор внедрения $Fe_{\alpha}C$

Сплавы, образовывающие непрерывный ряд твердых растворов (рис.2.10): Fe – Ni; Fe – Co; Fe - Cr; Fe – Pd; Fe – Pt; Fe –V; Cu – Ni; Cu – Pd; Cu – Pt; Cu – Au; Cr – Mo; Cr – Ti; Cr – V; Cr – W; Bi – Sb и т.д.

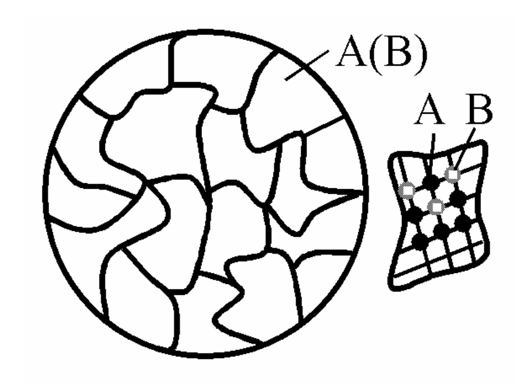
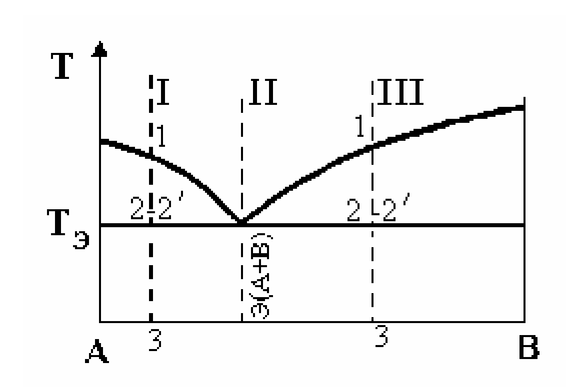


Рис. 2.10. Микроструктура сплавов, образующих твердые растворы

2.1.4. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых практически нерастворимы в твердом состоянии, с эвтектическим превращением

Эвтектикой (легкоплавящийся, греч.) называют высокодисперсную механическую смесь нескольких твердых фаз, одновременно кристаллизующихся при постоянной температуре расплава. Эвтектическим превращением называют процесс одновременной кристаллизации из расплава нескольких твердых фаз при постоянной температуре.



Вид диаграммы состояния сплава, компоненты которого практически не растворимы в твердом состоянии и образуют механическую смесь в результате эвтектического превращения, приведен на рис. 2.11. A, B – компоненты не взаимодействуют друг с другом.

Рассмотрим сплав **I – доэвтектический сплав** (рис. 2.12). В точке 1 начинается кристаллизация

веществ. На участке 1 – 2 начинает выпадать чистые компоненты вещества А. При переходе 2 – 2^{I} температура стабилизируется, происходит наращивание эвтектики (А+В) к зерном чистого компонента А. 2^{I} – 3 вокруг зерен компонента А образовались смесь (А +В), ниже точки 2^{I} охлаждение закристаллизовавшегося сплава.

II – эвтектический сплав (рис.2.11): 1 – 2 – охлаждение расплава (рис.2.13) , 2 – 2^{I} – выделение эвтектики, 2^{I} – 3 – охлаждение закристаллизовавшегося сплава.

III – заэвтектический сплав: 1 – 2 – выпадают кристаллы вещества В (рис.2.14). 2 – 2^{I} – образуется эвтектика (А + В), ниже 2^{I} происходит охлаждение закристаллизовавшегося сплава.

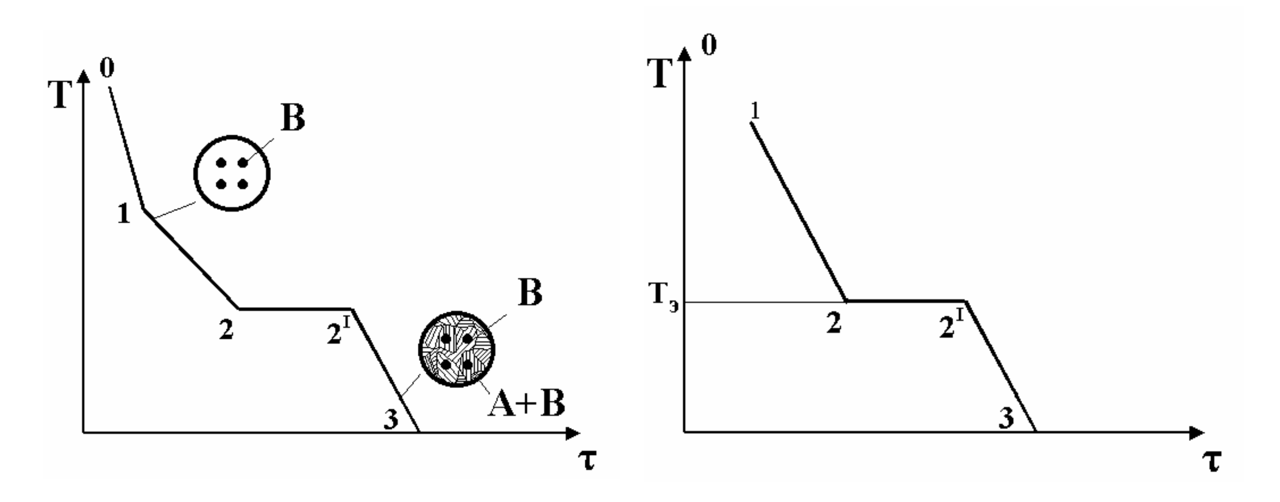


Рис. 2.12. Процесс кристаллизации доэвтектического сплава I

Рис. 2.13. Кривая охлаждения эвтектического сплава

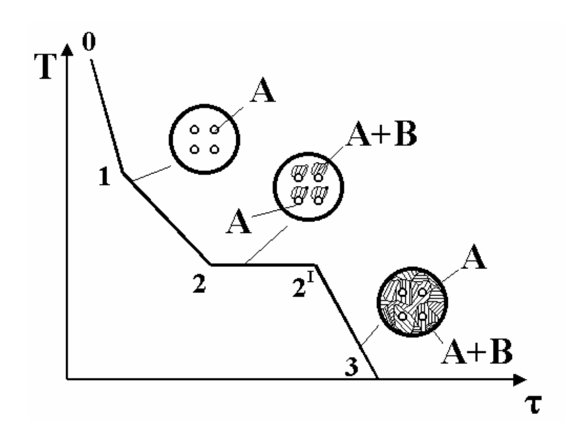


Рис. 2.14. Кривая охлаждения заэвтектического сплава

2.1.5. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

К таким сплавам относятся: Al – Cu, Al – Si, Cu – Ag, Pb – Sn и др. Рассмотрим диаграмму (рис.2.15): АВС – ликвидус; АЕДС – солидус; α и β – твердые растворы замещения или внедрения. До точки F образуется твердый раствор α, где А – растворитель, В – растворимое вещество. После точки G образуется твердый раствор β, где В – растворитель, А – растворимое вещество. По линии Э – эвтектика. Справа будет вещество В + эвт; слева А + эвтектика.

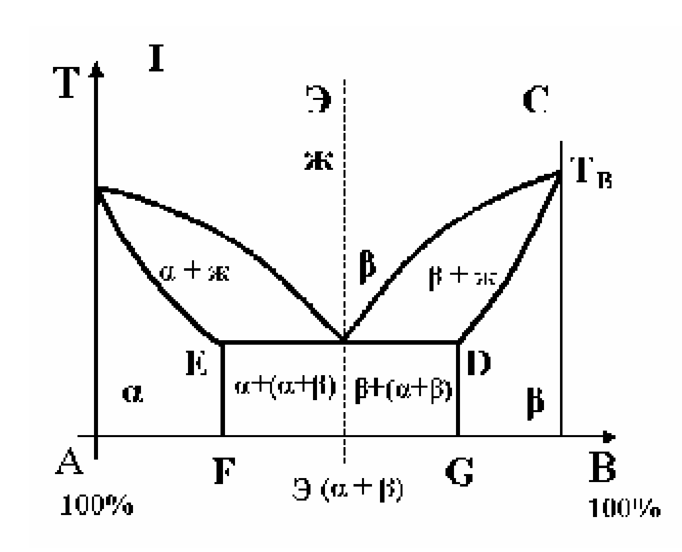


Рис. 2.15. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов

2.1.6. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивые химические соединения

Известны сплавы, компоненты которых образуют устойчивое химическое соединение постоянного и переменного состава, неустойчивые промежуточные фазы. Вид диаграммы состояния таких сплавов представлен на рис. 2.16. Фаза $A_m B_n$ – устойчивое химическое соединение.

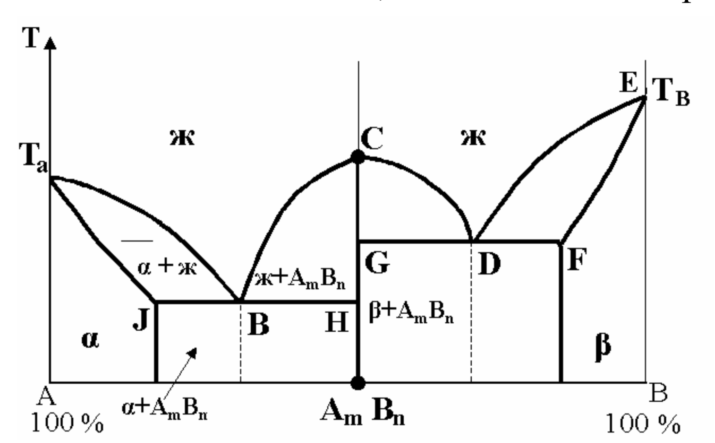


Рис. 2.16. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивые химические соединения $\boldsymbol{A_m B_n}$

2.1.7. Связь диаграммы состояния и свойств сплавов

Н.С. Курнаковым, одним из основоположников физико-химического анализа, установлена взаимосвязь диаграммы состояния и свойств от их состава. При образовании механической твердой смеси в сплавах, компоненты которых практически не растворяются в твердом состоянии, механические, электрические, магнитные свойства сплавов изменяются линейно (рис. 2.17, а). Неограниченно растворяющиеся в твердом состоянии металлы в сплавах образуют непрерывный ряд твердых растворов, свойства которых изменяются по криволинейной зависимости (рис. 2.17, б). Изменение размеров кристаллической решетки компонентов при образовании твердых растворов обусловливает увеличение электрического сопротивления, твердости и коэрцитивной силы сплавов, уменьшение их пластичности. При образовании сплавов с ограниченной растворимостью компонентов функциональная зависимость свойств – состав приобретает более сложный вид (рис. 2.17, в). В области однофазных твердых растворов α и β она криволинейна. Присутствие в сплаве высокодисперсной механической смеси $\alpha + \beta$ приводит к адекватному изменению свойств в зависимости от состава.

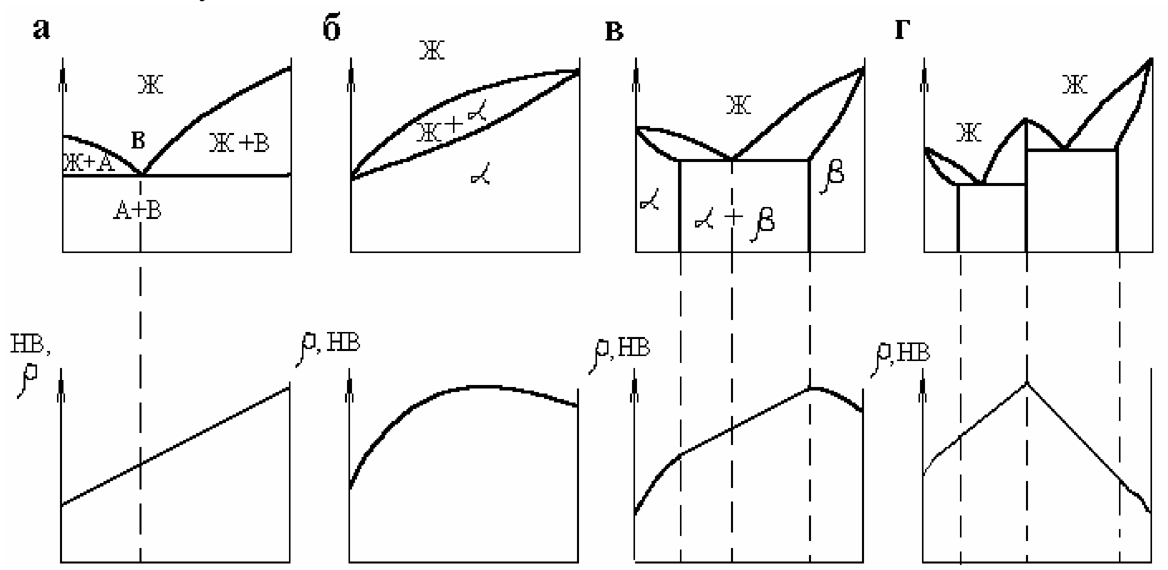


Рис. 2.17. Корреляция типа диаграммы состояния и свойств сплавов с компонентами:
а - практически нерастворимыми в твердом состоянии;
б – неограниченно растворимыми в твердом состоянии;
в – ограниченно растворимыми в твердом состоянии;
г – образующими химическое соединение

Химические соединения типа A_mB_n, образующихся в сплавах, обладают свойствами, резко отличающимися от свойств исходных компонентов A и B. Вследствие этого на кривых состав – свойство в месте сингулярной точки (точка образования химического соединения постоянного состава) появляется характерный перелом (рис. 2.17, г). Отмеченные закономерности позволяют создавать промышленные сплавы с заданными свойствами.

2.1.8. Диаграммы состояния тройных сплавов

Широкое распространение в приборостроении нашли сплавы, состоящие из трех и более компонентов. Для их графического описания используются тройные диаграммы состояния. Последние имеют вид сложных пространственных фигур, основанием которых является равносторонний треугольник (рис. 2.18), называемый концентрационным. В его углах указывают компоненты, образующие сплав. Например, сплав точки D содержит 10 % компонента A, 60 % компонента B и 30 % компонента C. Соответственно сплав, соответствующий точке E, - 40 % A, 40 % B и 20 %C. Концентрацию сплавов определяют по ходу часовой стрелки. Содержание компонента A пропорционально длине отрезка *a*, B – отрезка *в* и C – отрезка *c*. При построении тройной диаграммы значения температур откладывают по граням призмы.

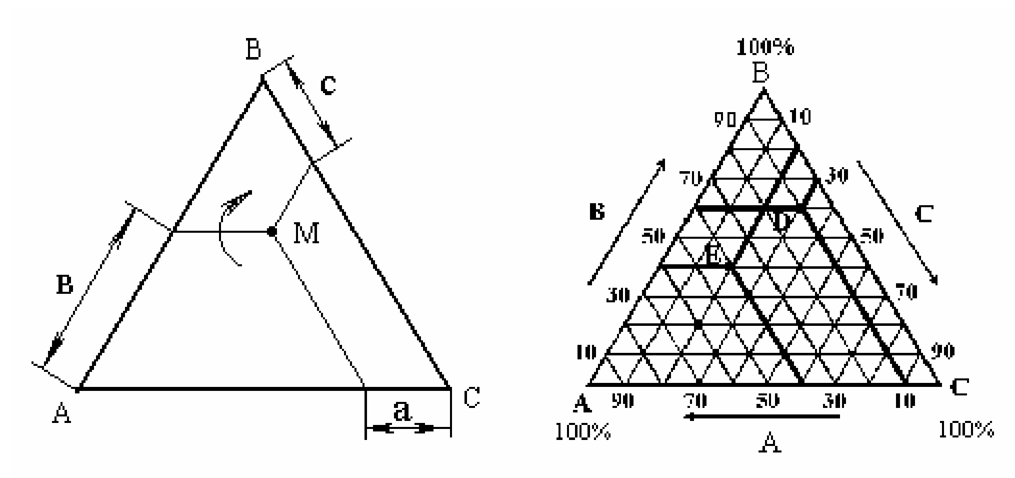


Рис. 2.18. Концентрационные треугольники тройного сплава

Для построения общей диаграммы состояния тройного сплава пользуются кривыми охлаждения. Экспериментально определяют критические точки переносят на перпендикуляры, восстановленные из точек концентрационного треугольника, соответствующего данным сплавам. Полученные семейства точек соединяют криволинейными поверхностями. Боковые грани диаграммы состояния тройного сплава

(рис. 2.19) представляют собой диаграммы состояния двойных систем AB, BC, AC.

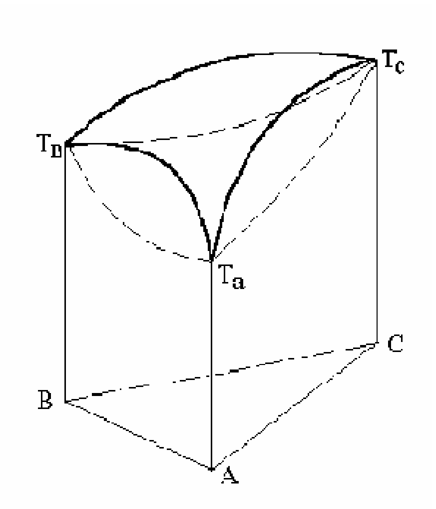


Рис. 2.19. Диаграмма состояния тройных сплавов

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные свойства металлов. Чем обусловлена высокая прочность, электропроводность и теплопроводность металлов?
2. Что является движущей силой процесса кристаллизации металлов?
3. Опишите этапы процесса кристаллизации металлов.
4. Диаграмма состояния сплавов, образующих непрерывный ряд твердых растворов. Микроструктура таких сплавов. Примеры сплавов.
5. Диаграмма состояния сплавов с эвтектическим превращением и с ограниченной растворимостью компонентов.

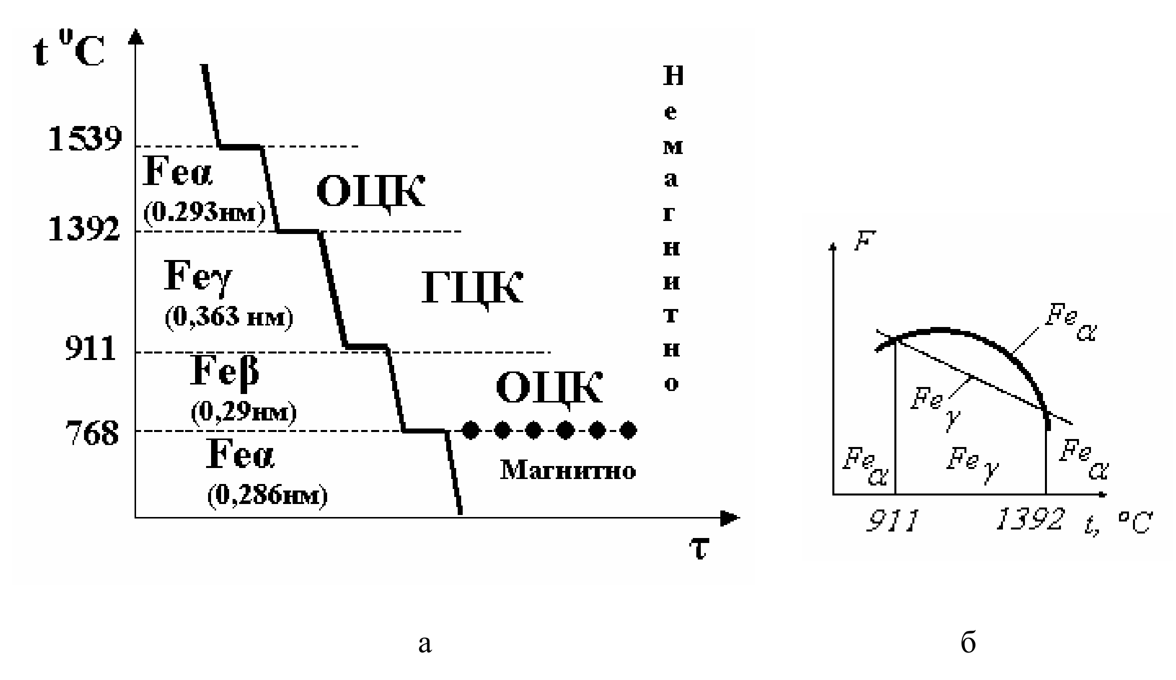
2.2. Железо и его сплавы

2.2.1. Свойства железа

Известно более двух тысяч марок сталей – сплавов на основе железа. Роль этих материалов очень велика, они занимают лидирующее положение по выпуску.

Содержание Fe в земной коре примерно равняется 4,5 %. Это четвертый по распространенности в природе элемент. Железо, элемент восьмой группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева, располагающийся в триаде Fe, Co, Ni. Механические характеристики железа: ρ = 7,68 г/см^3, σ_B = 200…250 МПа, НВ = 70…80, относительное удлинение железа δ = 50…60 %, т.е. железо, очень пластичный материал.

Аллотропические формы Fe (рис. 2.20, а): Fe_α, Fe_β, Fe_γ, Fe_α в интервале температур от 1392 °С до температуры плавления 1539 °С называется Fe_δ, его период уменьшается, а = 0,293 нм. Fe_γ имеет гранецентрированную кристаллическую решетку. Аллотропические превращения железа объясняются свободной энергией железа (рис 2.20, б). До Т = 911 °С кристаллическая решетка объемно – центрированная кубическая, характерна для Fe_α, Fe_β. В скобках (рис. 2.20, а) указан период кристаллической решетки. При температуре выше точки Кюри материал становится немагнитным. Для железа точка Кюри $T_к$ = 768 ^{0}С.



а б

Рис. 2.20. Кривая охлаждения чистого железа (а) и зависимость свободной энергии от температуры (б)

2.2.2. Диаграмма состояния сплава железо – углерод

Часть диаграммы, имеющая практическое значение, расположена в диаграмме концентраций углерода до 6,67 % , что соответствует химическому соединению Fe_3C, или цементиту, представлена на рис 2.21. Увеличенные области диаграммы состояния железо - углерод представлены на рис. 2.22: перитектическое превращение (рис.2.22, а), в – эвтектическое превращение и (рис.2.22, б)

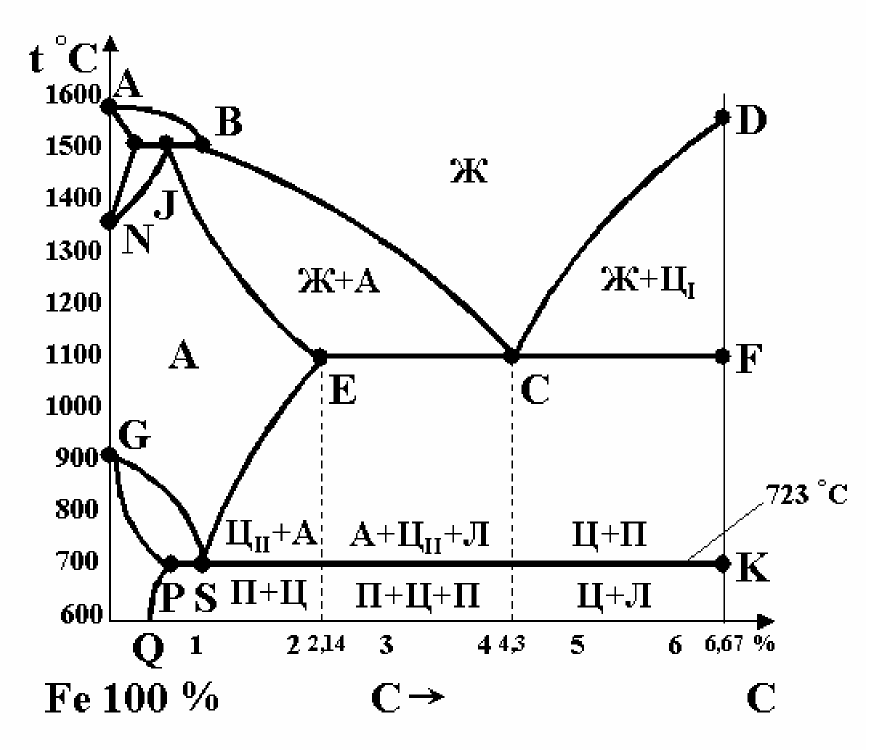
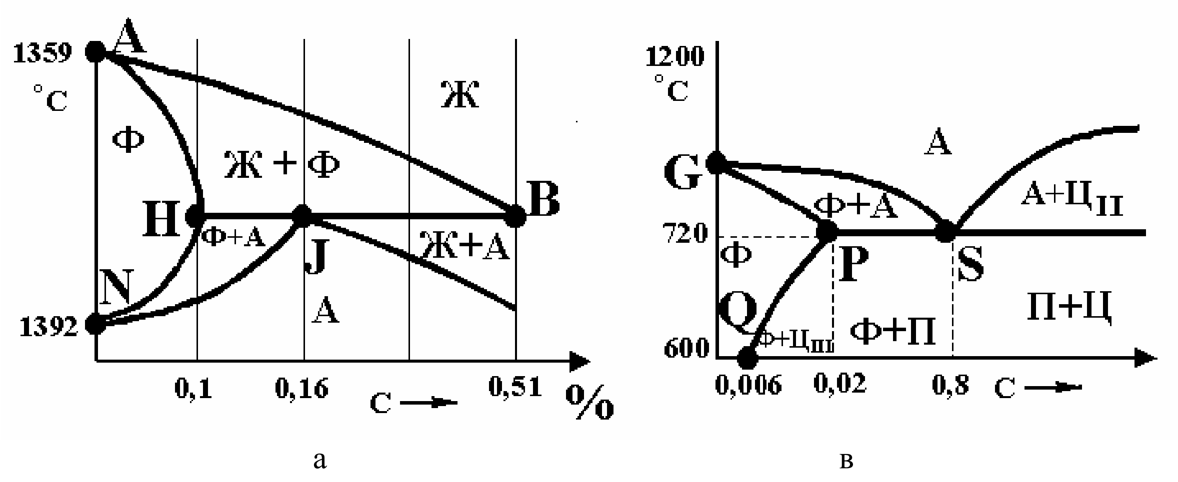


Рис.2.21. Диаграмма состояния системы железо - углерод
ABCD – линия ликвидус, AJECF – линия солидус



а   в

Рис. 2.22. Области диаграммы состояния железо - углерод:
а – перитектическое превращение, в – эвтектическое превращение

Сплавы, содержащие менее 0,02 % углерода, называются *техническим железом*, от 0, 02 до 2,14 % - *сталями*, от 2,14 до 6,7 % - *чугунами*.

Стали левее точки S (С < 0,8 %) – называются *доэвтектоидными*, с содержанием 0,8 % углерода - эвтектоидными, 0,8 %…2,4 % углерода - заэвтектоидные. Чугуны, содержащие 2…4,3% углерода – доэвтектические, 4,3 % С – эвтектическими, более 4,3 % С – заэвтектическими.

Фазовые и структурные изменения в сплавах Fe – Fe C после затвердевания. Такие изменения связаны с полиморфизмом железа, изменением растворимости углерода в аустените и феррите, понижением температуры и эвтектоидным превращением.

В системе Fe-C различают следующие фазы: жидкий сплав, твердые растворы – феррит и аустенит, а также цементит и графит. Микроструктура стали в равновесном состоянии представлена на рис. 2.23.

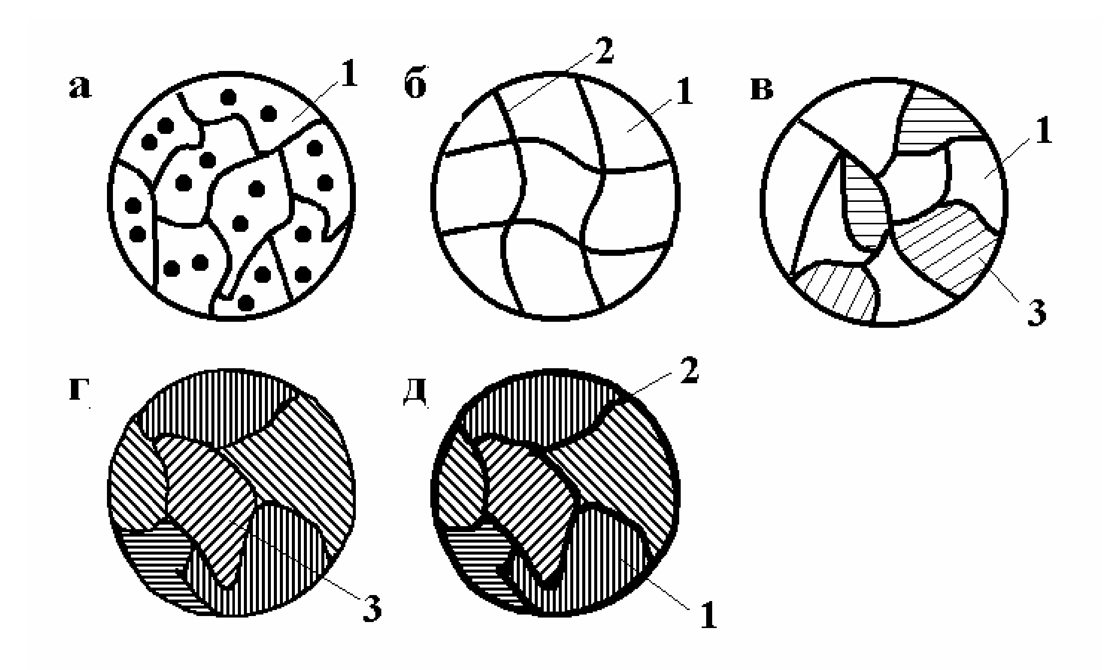


Рис. 2.23. Микроструктура стали: а – ферритная Ф; б – ферритно – цементитная Ф + Ц; в – ферритно – перлитная Ф +П; г – перлитная П; д – перлитно – цементитная П+Ц ; 1 – феррит; 2 – цементит; 3 – перлит

Феррит – твердый раствор углерода внедрения в α – железе. Обозначается **Ф** или **α**. Предельное содержание углерода при 723 °С ≈ 0,02 %, при 20 °С ≈ 0,006 %. Феррит по свойствам близок к чистому железу, мягок НВ = 60…80, пластичен. Применяют для изготовления магнитопроводов.

Аустенит – твердый раствор внедрения С в γ – железо. Устойчив только при высоких температурах. С примесями Mn, Cr устойчив даже при низких температурах. Твердость НВ = 170…200. Обозначается А или γ.

Цементит – карбид, железо (Fe_3C) – химическое соединение, содержащее 6,67 % углерода является составной частью эвтектической смеси, а также самостоятельной структурой сплава. Цементит неустойчив и распадается при термической обработке. Цементит очень тверд НВ = 800 и хрупок. Решетка сложная, ромбическая, плотноупакованная. Температура плавления цементита – $t_{пл}$ = 1250 °С. До t = 210 °С цементит магнитен. Обозначается буквой Ц.

Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита, образуется в процессе распада аустенита при 723 °С и содержании углерода 0,83 %.

Структура перлита может быть пластичной и зернистой. Прочность пластичного перлита выше чем зернистого обозначается П.

Ледебурит – смесь (эвтектическая) аустанита и цементита, образующаяся при 1130 °С и содержащая углерода 4,3 %. Обозначается Л.

Структура неустойчива: при охлаждении А, входящий в Л, распадается на вторичный цементит и перлит. НВ = 700, хрупок.

Графит – аллотропическая модификация углерода со слоистой гексагональной решеткой и слабой связью между слоями. Графит мягок, прочность его низкая. $t_{пл}$ = 3800 °С. Плотность 2500 кг/м^3. Химически стоек и электропроводен.

2.2.3. Зависимость свойств сплавов железа с углеродом от содержания в них углерода

Количество цементита в стали возрастает прямо пропорционально содержанию углерода. Твердые и хрупкие частицы цементита повышают сопротивление движению дислокаций, т.е. повышают сопротивление деформации, но уменьшают пластичность и вязкость. Вследствие этого с увеличением у стали углерода возрастает твердость, пределы прочности и текучести, и уменьшается относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость (рис. 2.24). Повышение содержания углерода облегчает переход стали в хладноломкое состояние. Каждая 0,1 % С повышает порог хладноломкости t_{50} в среднем на 20 %.

С увеличением углерода в стали снижается плотность, растет электрическое сопротивление и коэрцитивная сила и понижается теплопроводность, остаточная индукция и магнитная проницаемость.

Классификация сталей по содержанию углерода

С < 0,25 % - *низкоуглеродистое*

0,25 < C < 0,6 % - *среднеуглеродистое*

C > 0,6 % - *высокоуглеродистое*

Низкоуглеродистые стали обладают невысокой твердостью, высокой пластичностью. *Среднеуглеродистые* - обладают высокой твердостью, но менее пластичны. *Высокоуглеродистые стали* обладают высокой твердостью, прочностью и низкой пластичностью.

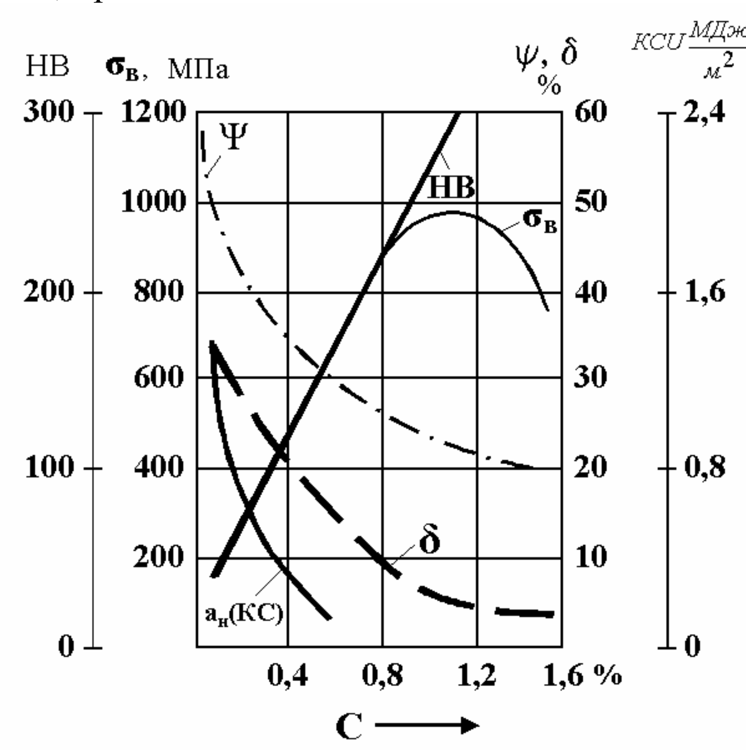


Рис. 2.24. Зависимость механических свойств стали от содержания в ней углерода: КС ($a_н$) – ударная вязкость; ψ – относительное сужение, характер пластичности; δ - относительное удлинение, характер пластичности; НВ – твердость по Бринеллю; $\sigma_в$ – предел прочности

2.3. Основы теории термической обработки стали

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а, следовательно, и свойства является термическая обработка.

Термической обработкой называют процесс, включающий в себя следующие операции: нагрев изделия или заготовки до определенной температуры, выдержку при этой температуре и охлаждение с заданной скоростью. Термическая обработка позволяет изменить в желательном направлении структуру и свойства материалов в изделии, причем диапазон регулирования свойств может быть очень широким. Термическая обработка может сочетаться с химическим воздействием или с пласти-

ческим деформированием, что расширяет ее возможности. Все основные виды термической, химико-термической, термомеханической и механотермической обработки основаны на протекании процессов перекристаллизации в структуре металлического материала. Факторами, влияющими на изменение структуры и свойств материала, является температура нагрева, его продолжительность и скорость, а также скорость охлаждения.

Основы термической обработки разработал Д.К. Чернов. В дальнейшем они развивались в работах Бочвара А.А., Курдюмова Г.В., Гуляева А.П.

2.3.1. Превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении

Любая разновидность термической обработки состоит из комбинации четырех основных превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии (рис 2.25).

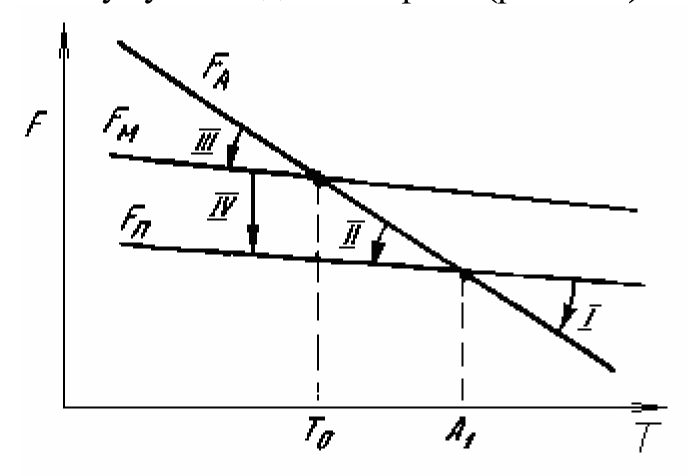


Рис. 2.25. Зависимость свободной энергии структурных составляющих сталей от температуры: аустенита (F_A), мартенсита (F_M), перлита ($F_П$)

1. Превращение перлита в аустенит $(П \rightarrow A)$, происходит при нагреве выше критической температуры A_1, минимальной свободной энергией обладает аустенит.

$$Fe_\alpha(C) + Fe_3C \rightarrow Fe_\gamma(C)$$

2. Превращение аустенита в перлит $(A \rightarrow П)$, происходит при охлаждении ниже A_1, минимальной свободной энергией обладает перлит:

$$Fe_\gamma(C) + Fe_\alpha C \rightarrow Fe_3(C)$$

3. Превращение аустенита в мартенсит $(A \rightarrow M)$, происходит при быстром охлаждении ниже температуры нестабильного равновесия

$$Fe_{\gamma}(C) \rightarrow Fe_{\alpha}(C)'$$

4. Превращение мартенсита в перлит $(M \rightarrow П)$; – происходит при любых температурах, т.к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита.

$$Fe_{\alpha}(C)' \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + Fe_3C$$

2.3.2. Механизм основных превращений

2.3.2.1. Превращение перлита в аустетит

Превращение основано на диффузии углерода, сопровождается полиморфным превращением $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$, а так же растворением цементита в аустените.

Для исследования процессов строят диаграммы изотермического образования аустенита (рис.2.26). Для этого образцы нагревают до температуры выше A_1 и выдерживают, фиксируя начало и конец превращения.

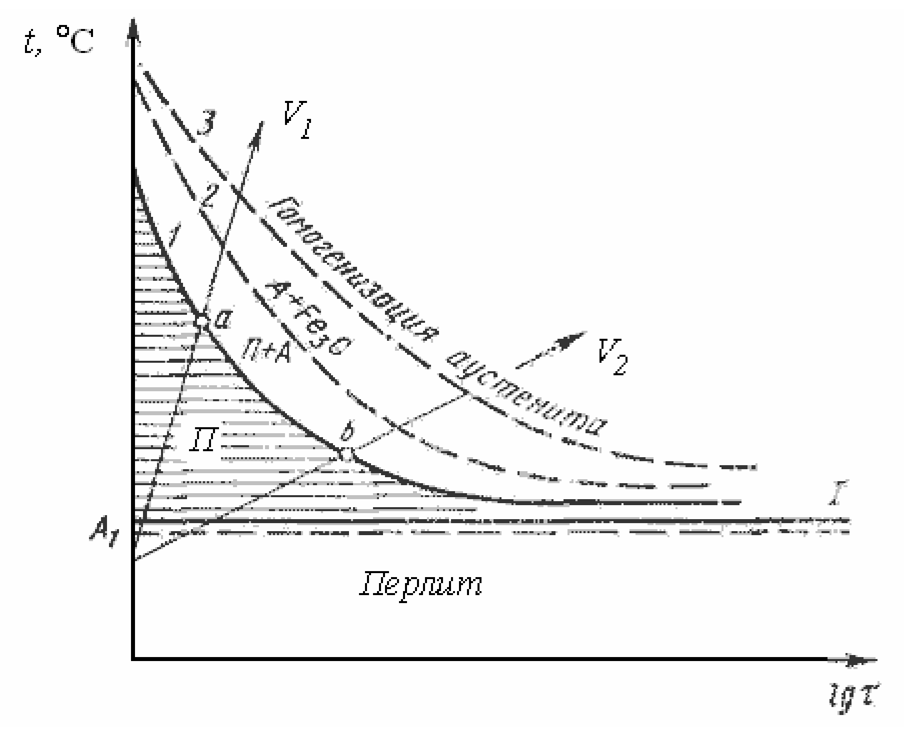


Рис.2.26. Диаграмма изотермического образования аустенита: 1 - начало образования аустенита; 2 - конец преобразования перлита в аустенит; 3 - полное растворение цементита.

С увеличением перегрева и скорости нагрева продолжительность превращения сокращается.

Механизм превращения представлен на рис.2.27.

Превращение начинаются с зарождения центров аустенитных зерен на поверхности раздела феррит – цементит, кристаллическая решетка Fe_{α} перестраивается в решетку Fe_{γ} .

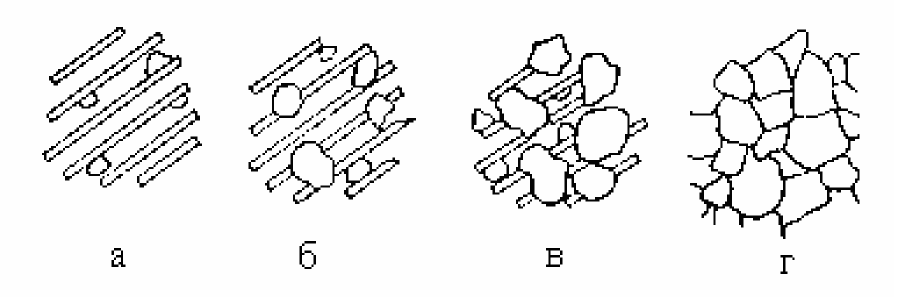


Рис. 2.27. Механизм превращения перлита в аустенит

Время превращения зависит от температуры, так как с увеличением степени перегрева уменьшается размер критического зародыша аустенита, увеличиваются скорость возникновения зародышей и скорость их роста

Образующиеся зерна аустенита имеют вначале такую же концентрацию углерода, как и феррит. Затем в аустените начинает растворяться вторая фаза перлит – цементит, следовательно, концентрация углерода увеличивается. Превращение Fe_{α} в Fe_{γ} идет быстрее. После того, как весь цементит растворится, аустенит неоднороден по химическому составу: там, где находились пластинки цементита концентрация углерода более высокая. Для завершения процесса перераспределения углерода в аустените требуется дополнительный нагрев или выдержка.

Величина образовавшегося зерна аустенита оказывает влияние на свойства стали.

Рост зерна аустенита. Образующиеся зерна аустенита получаются мелкими (начальное зерно). При повышении температуры или выдержке происходит рост зерна аустенита. Движущей силой роста является разность свободных энергий мелкозернистой (большая энергия) и крупнозернистой (малая энергия) структуры аустенита.

Стали различают по склонности к росту зерна аустенита. Если зерно аустенита начинает быстро расти даже при незначительном нагреве выше температуры A_1 , то сталь наследственно крупнозернистая.

Если зерно растет только при большом перегреве, то сталь наследственно мелкозернистая.

Склонность к росту аустенитного зерна является плавочной характеристикой. Стали одной марки, но разных плавок могут различаться, так как содержат неодинаковое количество неметаллических включений, которые затрудняют рост аустенитного зерна.

Ванадий, титан, молибден, вольфрам, алюминий – уменьшают склонность к росту зерна аустенита, а марганец и фосфор – увеличивают ее.

Заэвтектоидные стали менее склонны к росту зерна.

При последующем охлаждении зерна аустенита не измельчаются. Это следует учитывать при назначении режимов термической обработки, так как от размера зерна зависят механические свойства. Крупное зерно снижает сопротивление отрыву, ударную вязкость, повышает порог хладоломкости. Различают величину *зерна наследственного* и *действительного*. Для определения величины наследственного зерна, образцы нагревают до 930 °С и затем определяют размер зерна.

Действительная величина зерна – размер зерна при обычных температурах, полученный после той или иной термической обработки.

Неправильный режим нагрева может привести либо к *перегреву*, либо к *пережогу* стали.

Перегрев. Нагрев доэвтектоидной стали значительно выше температуры A_3 приводит к интенсивному росту зерна аустенита. При охлаждении феррит выделяется в виде пластинчатых или игольчатых кристаллов. Такая структура называется видманштеттовая структура и характеризуется пониженными механическими свойствами. Перегрев можно исправить повторным нагревом до оптимальных температур с последующим медленным охлаждением.

Пережог имеет место, когда температура нагрева приближается к температуре плавления. При этом наблюдается окисление границ зерен, что резко снижает прочность стали. Излом такой стали камневидный. Пережог – неисправимый брак.

2.3.2.2. Превращение аустенита в перлит при медленном охлаждении

$$Fe_\gamma(C) \rightarrow Fe_\alpha(C) + Fe_3C$$

Превращение связано с диффузией углерода, сопровождается полиморфным превращением $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$, выделением углерода из аустенита в виде цементита, разрастанием образовавшегося цементита.

В зависимости от степени переохлаждения различают три области превращения. Вначале, с увеличением переохлаждения скорость превращения возрастает, а затем убывает. При температуре 727 °С и ниже 200°С скорость равна нулю. При температуре 200°С равна нулю скорость диффузии углерода.

Закономерности превращения

Образцы нагревают до температуры, при которой структура состоит из однородного аустенита (770°С). Затем переносят в термостаты с заданной температурой (интервал 25 – 50°С). Превращение аустенита можно легко обнаружить с помощью наблюдений за изменением магнитных характеристик, так как аустенит парамагнитен, а феррит и цементит обладают магнитными свойствами.

Получают серию кинетических кривых (рис. 2.28, а), которые показывают количество образовавшегося перлита в зависимости от времени, прошедшего с начала превращения.

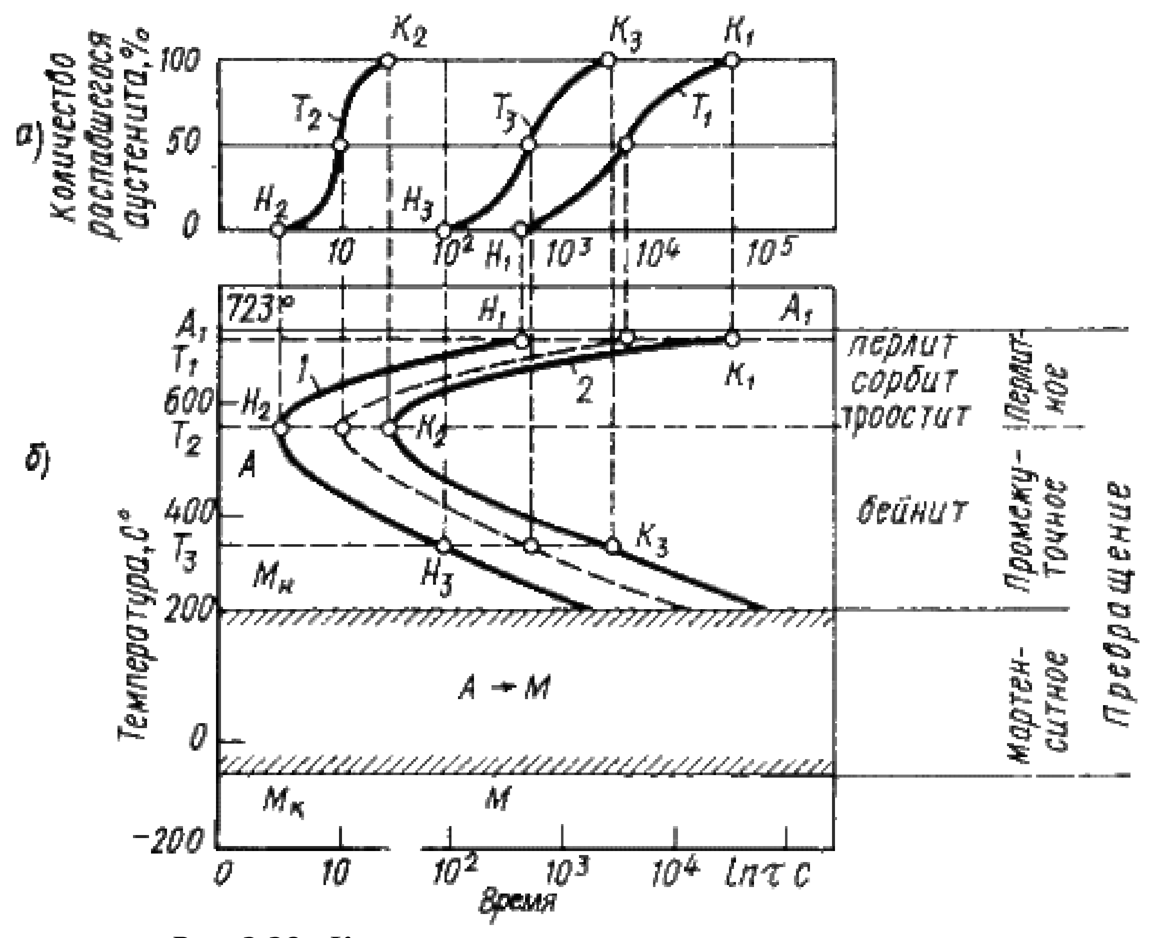


Рис. 2.28. Кинетические кривые превращения аустенита при охлаждении (а); диаграмма изотермического превращения аустенита (б)

В начале наблюдается инкубационный подготовительный период, время, в течение которого сохраняется переохлажденный аустенит. Превращение протекает с различной скоростью и достигает максимума при образовании 50 % продуктов распада.

Затем скорость начинает уменьшаться и постепенно затухает. С увеличением степени переохлаждения устойчивость аустенита уменьшается, а затем увеличивается.

Горизонтальная линия $M_н$ показывает температуру начала бездиффузного мартенситного превращения. Такие диаграммы называются *диаграммами изотермического превращения аустенита* (рис.2.28, б).

При малых степенях переохлаждения, в области температур 727…550°С, сущность превращения заключается в том, что в результате превращения аустенита образуется механическая смесь феррита и цементита, состав которой отличается от состава исходного аустенита. Аустенит содержит 0,8 % углерода, а образующиеся фазы: феррит – 0,02 %, цементит – 6,67 % углерода.

Время устойчивости аустенита и скорость его превращения зависят от степени переохлаждения.

Максимальная скорость превращения соответствует переохлаждению ниже температуры A_1 на 150…200°С, то есть соответствует минимальной устойчивости аустенита.

Механизм превращения представлен на рис.2.29.

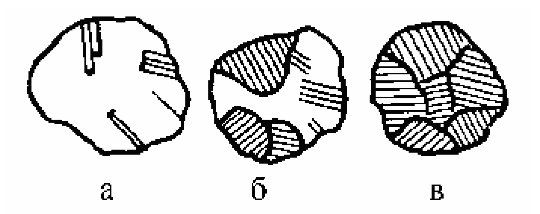


Рис. 2.29. Механизм превращения аустенита в перлит

При образовании перлита из аустенита ведущей фазой является цементит. Зарождение центров кристаллизации цементита облегчено на границе аустенитных зерен. Образовавшаяся пластинка цементита растет, удлиняется и обедняет соседние области углеродом. Рядом с ней образуются пластинки феррита. Эти пластинки растут как по толщине, так и по длине. Рост образовавшихся колоний перлита продолжается до столкновения с кристаллами перлита, растущими из других центров.

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит процесс его распада.

Толщина соседних пластинок феррита и цементита определяет дисперсность структуры и обозначается Δ_0. Она зависит от температу-

ры превращения. В зависимости от дисперсности продукты распада имеют различное название.

$\Delta_0 \approx (0,5...0,7)10^{-3}$ мм – перлит.

Образуется при переохлаждении до температуры Т = 650…700 °С, или при скорости охлаждения $V_{охл}$ = 30…60 °С/ч. Твердость составляет 180…250 НВ.

$\Delta_0 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ мм – сорбит

Образуется при переохлаждении до температуры Т = 600…650 °С, или при скорости охлаждения $V_{охл}$ = 60 °С/с. Твердость составляет 250…350 НВ. Структура характеризуется высоким пределом упругости, достаточной вязкостью и прочностью.

$\Delta_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ мм – троостит

Образуется при переохлаждении до температуры Т = 550…600 °С, или при скорости охлаждения $V_{охл}$ = 150 °С/с. Твердость составляет 350…450 НВ. Структура характеризуется высоким пределом упругости, малой вязкостью и пластичностью.

Твердость ферритно-цементитной смеси прямо пропорциональна площади поверхности раздела между ферритом и цементитом.

Если температура нагрева незначительно превышала температуру A_1 и полученный аустенит неоднороден по составу, то при малой степени переохлаждения образуется зернистый перлит.

Промежуточное превращение

При температуре ниже 550 °С самодиффузия атомов железа практически не происходит, а атомы углерода обладают достаточной подвижностью. Механизм превращения состоит в том, что внутри аустенита происходит перераспределение атомов углерода и участки аустенита, обогащенные углеродом превращаются в цементит.

Превращение обедненного углеродом аустенита в феррит происходит по сдвиговому механизму, путем возникновения и роста зародышей феррита. Образующиеся при этом кристаллы имеют игольчатую форму. Такая структура, состоящая из цементита и феррита, называется *бейнитом*. Особенностью является повышенное содержание углерода в феррите (0.1…0.2 %). Дисперсность кристаллов феррита и цементита зависят от температуры превращения.

При температуре $550^0 C - \Delta_0 = 0,12 \cdot 10^{-3}$ мм – *верхний бейнит*. Структура характеризуется недостаточной прочностью, при низких относительном удлинении (δ) и ударной вязкости ($a_н$).

При температуре 300°С – $300^0 C - \Delta_0 = 0{,}08 \cdot 10^{-3}$ – *нижний бейнит*. Структура характеризуется высокой прочностью в сочетании с пластичностью и вязкостью.

2.3.2.3. Превращение аустенита в мартенсит при высоких скоростях охлаждения

Данное превращение имеет место при высоких скоростях охлаждения, когда диффузионные процессы подавляются. Сопровождается полиморфным превращением Fe_γ в Fe_α.

При охлаждении стали со скоростью, большей критической ($V >$ V*к*), превращение начинается при температуре начала мартенситного превращения ($M_н$) и заканчивается при температуре окончания мартенситного превращения ($M_к$). В результате такого превращения аустенита образуется продукт закалки – *мартенсит*.

Минимальная скорость охлаждения V*к*, при которой весь аустенит переохлаждается до температуры .$M_н$ и превращается, называется *критической скоростью закалки*.

Так как процесс диффузии не происходит, то весь углерод аустенита остается в решётке Fe_α и располагается либо в центрах тетраэдров, либо в середине длинных ребер (рис. 2.30).

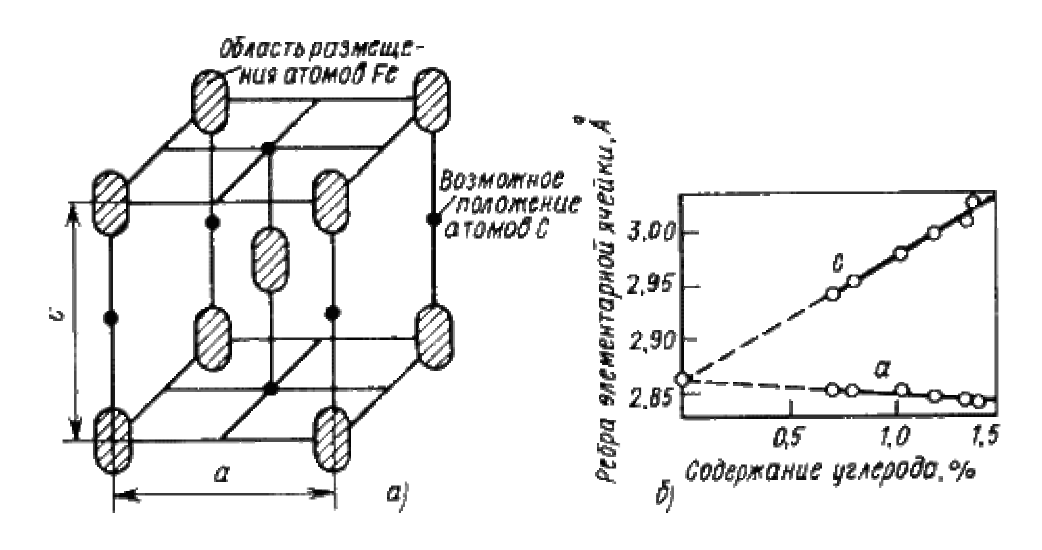


Рис. 2.30. Кристаллическая решетка мартенсита (а); влияние содержания углерода на параметры а и с решетки мартенсита (б)

Мартенсит – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в Fe_α.

При образовании мартенсита кубическая решетка Fe_{α} сильно искажается, превращаясь в тетрагональную (рис. 2.30, *а*). Искажение решетки характеризуется *степенью тетрагональности*: с/а > 1. Степень тетрагональности прямо пропорциональна содержанию углерода в стали (рис. 2.30, *б*).

Механизм мартенситного превращения имеет ряд особенностей.

1. Бездиффузионный характер.

Превращение осуществляется по сдвиговому механизму. В начале превращения имеется непрерывный переход от решетки аустенита к решетке мартенсита (когерентная связь). При превращении гранецентрированной кубической решетки в объемно-центрированную кубическую атомы смещаются на расстояния меньше межатомных, т.е. нет необходимости в самодиффузии атомов железа.

2. Ориентированность кристаллов мартенсита.

Кристаллы имеют форму пластин, сужающихся к концу, под микроскопом такая структура выглядит как игольчатая. Образуясь мгновенно пластины растут либо до границы зерна аустенита, либо до дефекта. Следующие пластины расположены к первым под углами 60° или 120°, их размеры ограничены участками между первыми пластинами (рис.2.31).



Рис. 2.31. Ориентированность кристаллов мартенсита

Ориентированный (когерентный) рост кристаллов мартенсита обеспечивает минимальную поверхностную энергию. При когерентном росте, из-за различия объемов аустенита и мартенсита, возникают большие напряжения. При достижении определенной величины кристаллов мартенсита, эти напряжения становятся равными пределу текучести аустенита. В результате этого нарушается когерентность и происходит отрыв решетки мартенсита от решетки аустенита. Рост кристаллов прекращается.

3. Очень высокая скорость роста кристалла, до *1000 м/с*.

4. Мартенситное превращение происходит только при непрерывном охлаждении. Для каждой стали начинается и заканчивается при определенной температуре, независимо от скорости охлаждения. Температуру начала мартенситного превращения называют мартенситной точкой M_H, а температуру окончания превращения – M_K. Температуры M_H и M_K зависят от содержания углерода и не зависят от скорости охлаждения Для сталей с содержанием углерода выше *0,6 %* M_K уходит в область отрицательных температур (рис.2.32).

Мартенситное превращение чувствительно к напряжениям, и деформация аустенита может вызвать превращение даже при температурах выше M_H. В сталях с M_K ниже 20°C присутствует аустенит остаточный, его количество тем больше, чем ниже M_H и M_K.(при содержании углерода 0,6…1,0 % количество аустенита остаточного – 10 %, при содержании углерода 1,5 % - до 50 %). В микроструктуре наблюдается в виде светлых полей между иглами мартенсита.

5. Превращение необратимое. Получить аустенит из мартенсита невозможно.

Свойства мартенсита обусловлены особенностями его образования. Он характеризуется высокой твердостью и низкой пластичностью, что обуславливает хрупкость.

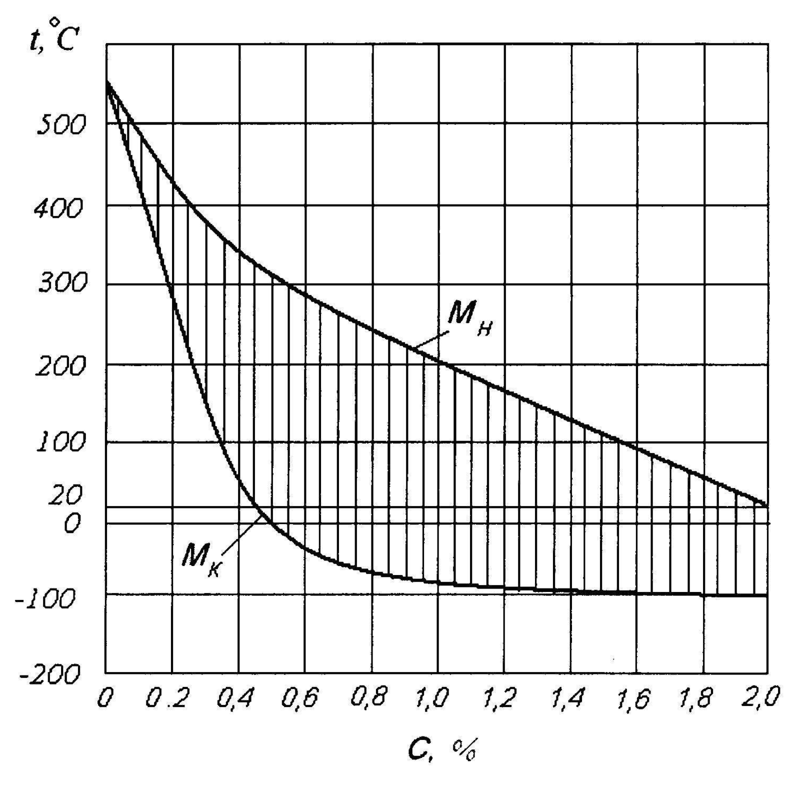


Рис.2.32. Зависимость температур начала (M_H) и конца (M_K) мартенситного превращения от содержания углерода в стали

Твердость составляет до 65 HRC. Высокая твердость вызвана влиянием внедренных атомов углерода в решетку α-фазы, что вызывает ее искажение и возникновение напряжений. С повышением содержания углерода в стали возрастает склонность к хрупкому разрушению.

2.3.2.4. Превращение мартенсита в перлит

Имеет место при нагреве закаленных сталей. Превращение связано с диффузией углерода.

Мартенсит закалки неравновесная структура, сохраняющаяся при низких температурах. Для получения равновесной структуры изделия подвергают отпуску.

При нагреве закаленной стали происходят следующие процессы.

При нагреве до 200°С происходит перераспределение углерода в мартенсите. Образуются пластинки ε– карбидов толщиной несколько атомных диаметров. На образование карбидов углерод расходуется только из участков мартенсита, окружающих кристаллы выделившихся карбидов. Концентрация углерода на этих участках резко падает, тогда как удаленные участки сохраняют концентрацию углерода. В стали присутсвуют карбиды и два α-твердых раствора мартенсита (с высокой и низкой концентрацией углерода. Такой тип распада мартенсита называется прерывистым. Скорость диффузии мала, карбиды не увеличиваются, распад мартенсита сопровождается зарождением новых карбидных частиц. Таким образом имеем структуру с неравномерным распределением углерода – *это мартенсит отпуска*. При этом несколько снижается тетрагональность решетки.

При нагреве до 300°С идет рост образовавшихся карбидов. Карбиды выделяются из мартенсита и он обедняется углеродом. Диффузия углерода увеличивается и карбиды растут в результате притока углерода из областей твердого раствора с высокой его концентрацией. Кристаллическая решетка карбидов когерентно связана с решеткой мартенсита.

В высокоуглеродистых сталях аустенит остаточный превращается в мартенсит отпуска. Наблюдается снижение тетрагональности решетки и внутренних напряжений. Структура – *мартенсит отпуска*:

При нагреве до 400°С весь избыточный углерод выделяется из Fe_{α}. Карбидные частицы полностью обособляются, приобретают строение цементита, и начинают расти. Форма карбидных частиц приближается к сферической.

Высокодисперсная смесь феррита и цементита называется *тростит отпуска*. При нагреве выше 400°C изменение фазового состава не происходит, изменяется только микроструктура. Имеет место рост и сфероидизация цементита. Наблюдается растворение мелких и рост крупных карбидных частиц.

При температуре 550…600°C имеем *сорбит отпуска*. Карбиды имеют зернистое строение. Улучшаются свойства стали.

При температуре 650…700°C получают более грубую ферритно-цементитную смесь – *перлит отпуска (зернистый перлит).*

2.3.3. Способы закалки стали

В зависимости от формы изделия, марки стали и нужного комплекса свойств применяют различные способы охлаждения (рис.2.33).

1. Закалка в одном охладителе (V_1).

Нагретую до нужной температуры деталь переносят в охладитель и полностью охлаждают. В качестве охлаждающей среды используют:

- воду – для крупных изделий из углеродистых сталей;
- масло– для небольших деталей простой формы из углеродистых сталей и изделий из легированных сталей.

Основной недостаток – значительные закалочные напряжения.

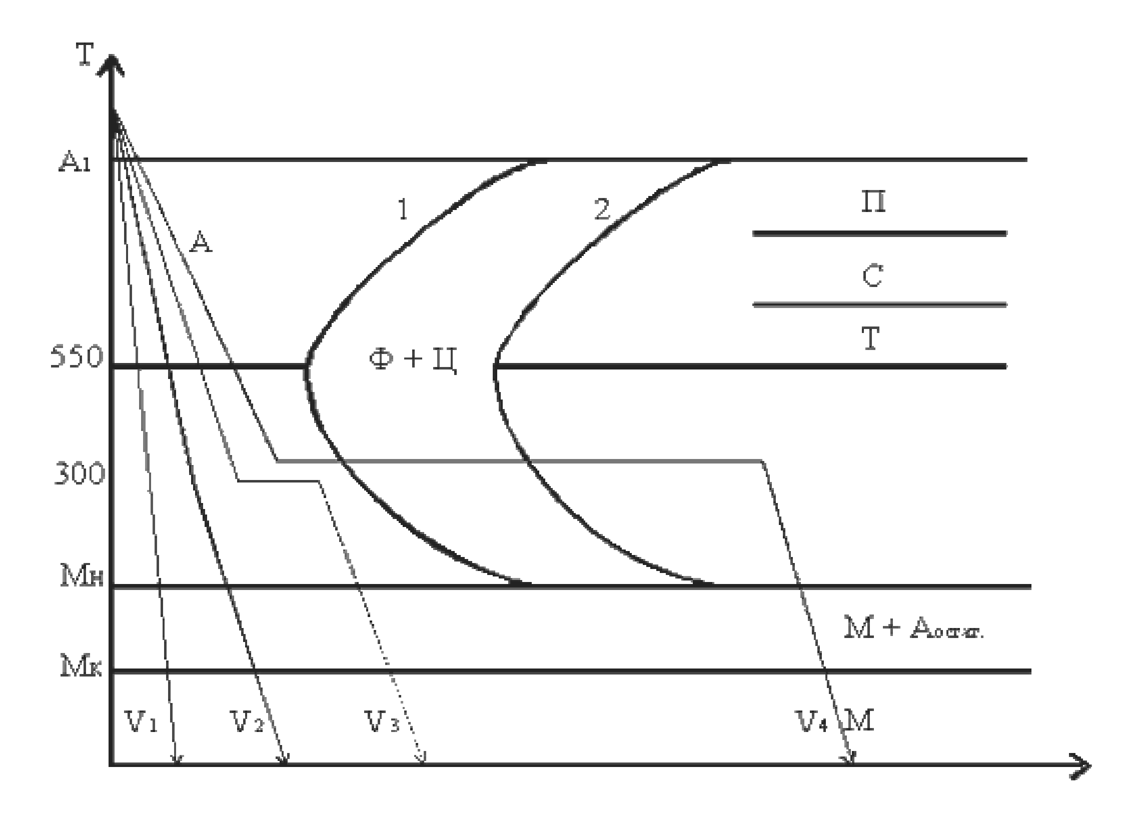


Рис. 2.33. Режимы закалки

2. Закалка в двух средах или прерывистая (V_2).

Нагретое изделие предварительно охлаждают в более резком охладителе (вода) до температуры ~ 300°С и затем переносят в более мягкий охладитель (масло).

Прерывистая закалка обеспечивает максимальное приближение к оптимальному режиму охлаждения.

Применяется в основном для закалки инструментов.

Недостаток: сложность определения момента переноса изделия из одной среды в другую.

3. Ступенчатая закалка (V_3).

Нагретое до требуемой температуры изделие помещают в охлаждающую среду, температура которой на 30 – 50°С выше точки $М_Н$ и выдерживают в течении времени, необходимого для выравнивания температуры по всему сечению. Время изотермической выдержки не превышает периода устойчивости аустенита при заданной температуре.

В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли или металлы. После изотермической выдержки деталь охлаждают с невысокой скоростью.

Способ используется для мелких и средних изделий.

4. Изотермическая закалка (V_4).

Отличается от ступенчатой закалки продолжительностью выдержки при температуре выше $М_Н$, в области промежуточного превращения. Изотермическая выдержка обеспечивает полное превращение переохлажденного аустенита в бейнит. При промежуточном превращении легированных сталей кроме бейнита в структуре сохраняется аустенит остаточный. Образовавшаяся структура характеризуется сочетанием высокой прочности, пластичности и вязкости. Вместе с этим снижается деформация из-за закалочных напряжений, уменьшаются и фазовые напряжения.

В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли и щелочи.

Применяются для легированных сталей.

5. Закалка с самоотпуском.

Нагретые изделия помещают в охлаждающую среду и выдерживают до неполного охлаждения. После извлечения изделия, его поверхностные слои повторно нагреваются за счет внутренней теплоты до требуемой температуры, то есть осуществляется самоотпуск. Применяется для изделий, которые должны сочетать высокую твердость на поверхности и высокую вязкость в сердцевине (инструменты ударного действия: молотки, зубила).

2.4. Виды термической обработки стали

Можно выделить четыре основных вида термической обработки стали: *отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалка, отпуск*.

2.4. 1. Отжиг и нормализация

Отжиг первого рода устраняет неоднородность материала, вызванную предшествующей обработкой. Его проводят при температуре выше или ниже температуры фазовых превращений (рис. 2.34, рис. 2.35) и подразделяют на гомогенизацию (диффузионный отжиг), рекристаллизационный отжиг и отжиг для снятия остаточных напряжений.

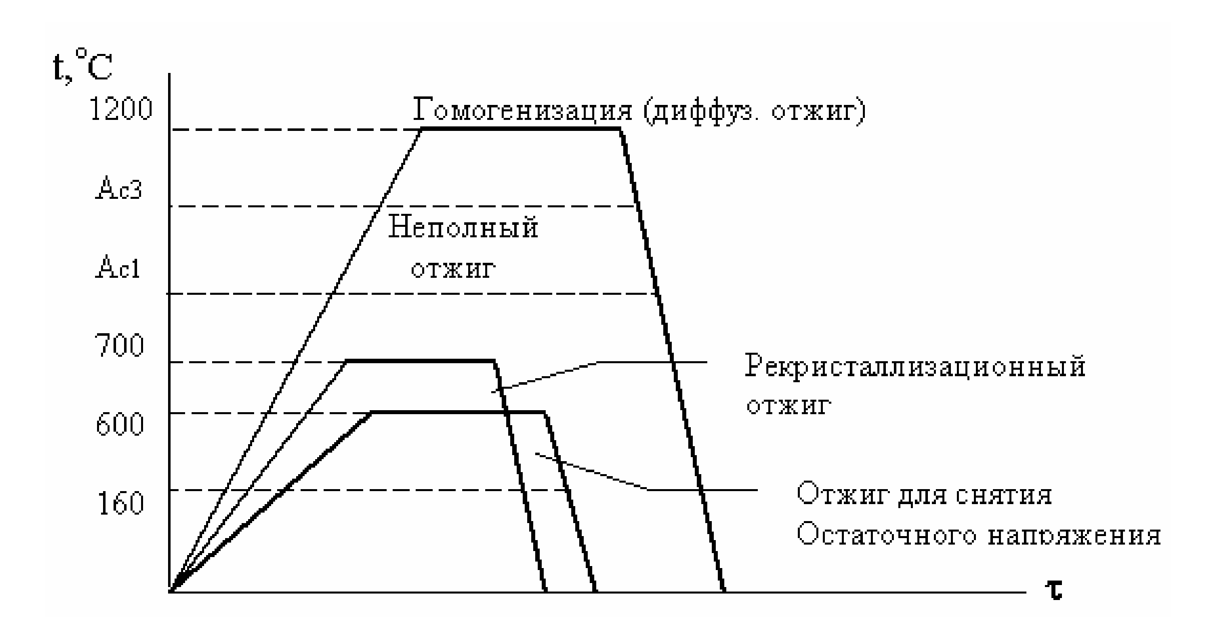


Рис. 2.34. Схема отжига первого рода

Гомогенизация – применяется для устранения дендритной ликвации стальных слитков и включает (рис. 6.10): нагрев до температуры 1100 – 1200 °С, выдержку при данной температуре в течение 8 – 20 часов, медленное охлаждение. Общее время гомогенизации 50 – 100 часов.

Рекристаллизационному отжигу подвергают холоднодеформированную сталь для снятия наклёпа. Режим: нагрев до 700 °С; выдержка в течение 0,5 – 1,5 часов; охлаждение.

Нормализация отличается от полного отжига большей скоростью охлаждения. Прочность и твёрдость нормализованной стали на 15 – 20 % выше, чем у отожжённой стали.

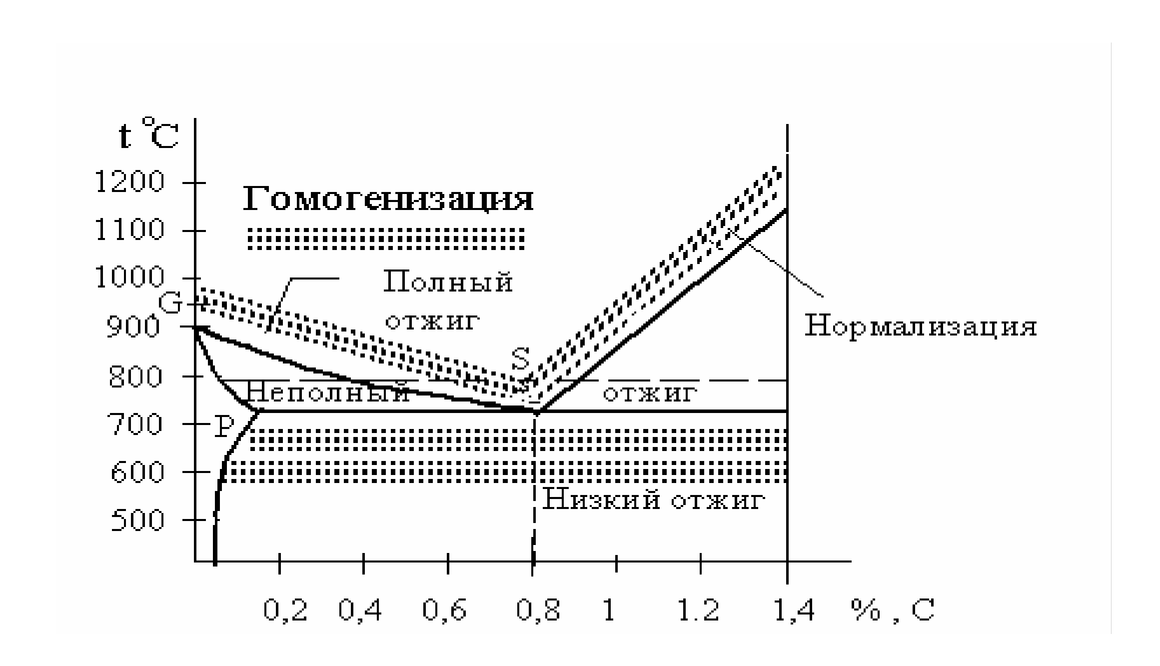


Рис. 2.35. Диаграмма различных видов отжига

Полный отжиг применяется для перекристаллизации доэвтектоидной стали с целью измельчения зерна и снятия остаточных напряжений. Отжиг складывается из нагрева на 30…50 °C выше температуры A_{c3}, прогрева для завершения фазового превращения и медленного охлаждения вместе с печью. В результате нагрева образуется мелкозернистый аустенит, который при охлаждении превращается в мелкозернистый перлит.

Неполный отжиг – нагрев идёт только до температуры на 10 – 30 °C выше A_{c1} (723 °C). Применяют для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей. Получается зернистая структура перлита вместо пластинчатой**.**

Отжиг для снятия остаточного напряжения. Производится после сварки, литья и механической обработки. Режим: нагрев (после резания – при 570 – 600 °C, после сварки – при 650 – 700 °C, после шлифовки – при 160 – 180 °C), выдержка 2 – 3 часа, охлаждение.

2.4.2. Закалка

Закалка – нагрев до температуры более высокой, чем температура фазового превращения (рис.2.36), выдержка при этой температуре и быстрое охлаждение со скоростью, превышающей критическую.

Главным отличием закалки от других операций термической обработки является высокая скорость охлаждения, достигаемая применением специальных закалочных сред (вода, масло, расплавленные соли или их водные растворы).

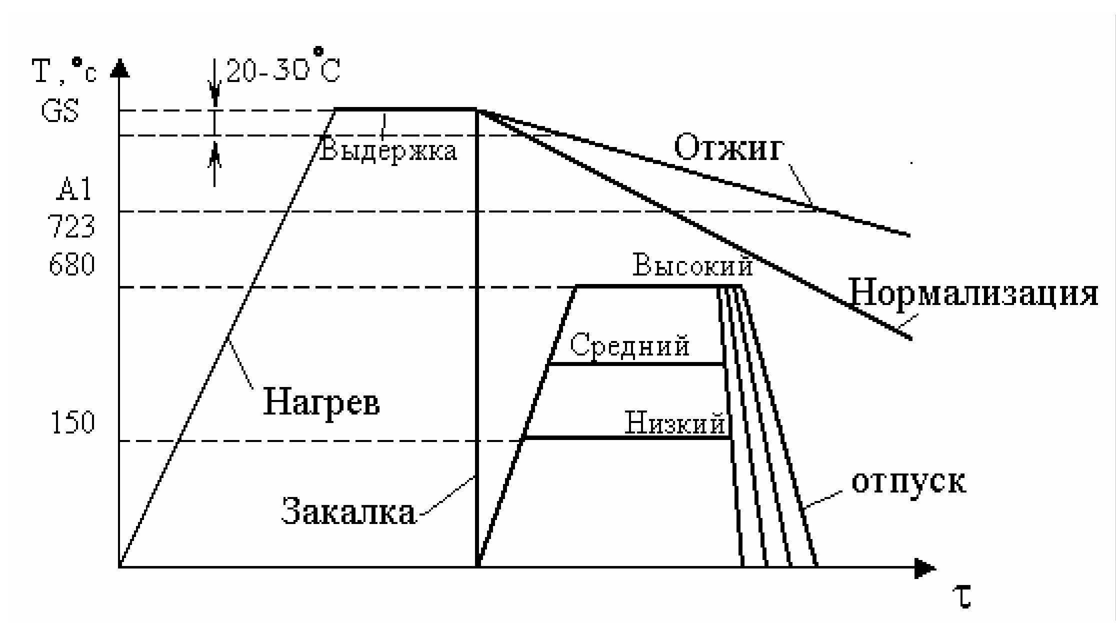


Рис.2.36. Температурно-временная характеристика различных видов термообработки

Прокаливаемость характеризует способность стали закаливаться на требуемую глубину (рис. 2.37) и оценивается по расстоянию от поверхности изделия до слоя, в котором содержится не менее 50% мартенсита. При закалке в воде максимальный диаметр $D_{кр}$ сквозной закалки больше, чем при закалке в масле.

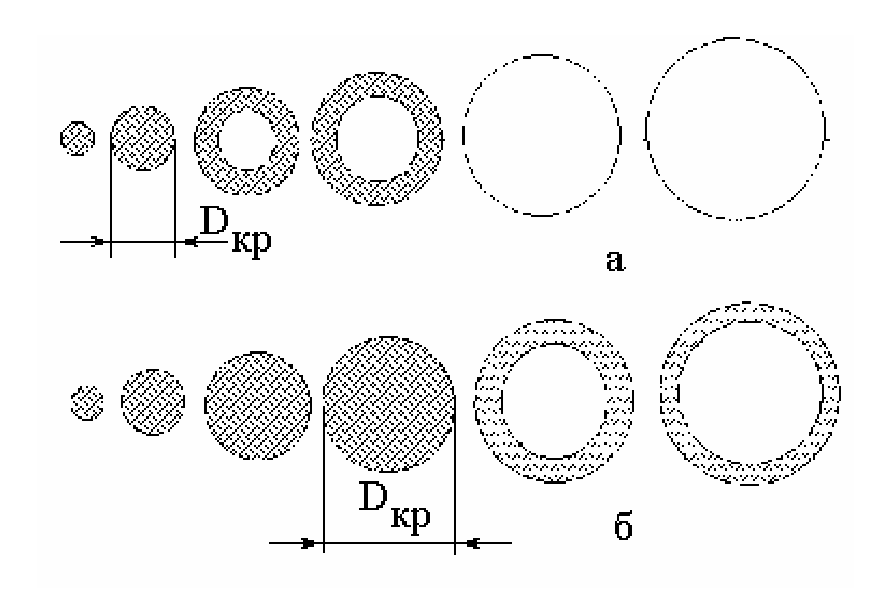


Рис.2.37. Прокаливаемость образцов в масле (а) и воде (б) (заштрихованы закаленные участки; незакаленная сердцевина не заштрихована, $D_{кр}$ – максимальный диаметр сквозной закалки)

2.4.3. Отпуск и искусственное старение

Отпуск – заключительная операция термической обработки. Цель – получение заданного комплекса механических свойств стали, а также неполное или частичное устранение закалочных напряжений.

Низкий отпуск – для углеродистых и низкоуглеродистых сталей, из которых изготовляются режущие и измерительные инструменты. Режим низкого отпуска: нагрев изделия до 150 – 200 °С, выдержка 1 – 1,5 часа, охлаждение. Твердость HRC 58 – 63, высокая износостойкость.

Средний отпуск – применяется для пружин, рессор, штампов. Режим: нагрев до 350 – 500 °С, выдержка 1 – 8 часов, охлаждение на спокойном воздухе (в воде). HRC 40 – 50, высокая упругость, выносливость.

Высокий отпуск – повышает временное сопротивление, предел текучести, относительное сужение, ударную вязкость. Режим: нагрев до 500 – 680 °С, выдержка 1 – 8 часов, охлаждение на воздухе (для легированных сталей – в воде или масле). HRC 25 – 30, наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

Старение – термическая обработка, которая производится для стабилизации внутренней структуры. *Естественное старение* происходит при обычной температуре. Максимальная твердость при естественном старении после весьма длительной выдержки – HRC 25 – 30. *Искусственное старение* происходит при нагреве стали до температур 100…170 °С. Нагрев существенно ускоряет процесс старения. Выдержка позволяет, не снижая твердости закаленной стали, стабилизировать состояние углерода в ее структуре за счет выделения его в виде дисперсных карбидов.

2.5. Химико-термическая обработка (ХТО)

В основе ХТО лежат диффузионные процессы. Это тепловая обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоёв.

Химико-термическая обработка позволяет повысить твёрдость, износоустойчивость, усталостную долговечность и контактную выносливость, а также стойкость изделия к окислению и электрохимической коррозии.

Модификация химического состава данного слоя имеет в большинстве способов химико-термической обработки диффузионный механизм, зависящий от температуры окружающей среды, температуры материала, давления окружающей среды и от времени.

2.5.1. Кинетика диффузионных процессов

Кинетика диффузии материала определяется тремя главными факторами: температурой, продолжительностью воздействия, начальной концентрацией диффундирующих атомов. Глубина диффузионного слоя зависит от времени (τ), температуры (Т) и давления, а также от начальной концентрации (С). Чем выше эти параметры, тем больше глубина диффузионного слоя (рис. 2.38).

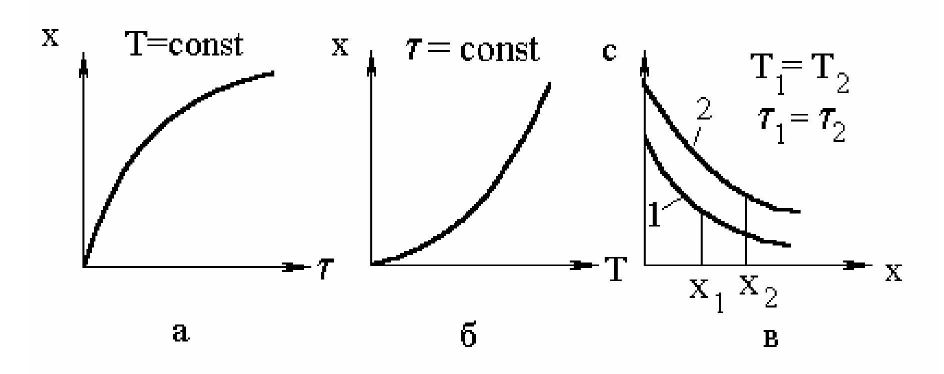


*Рис.2.38. Кривые диффузии модифицирующего элемента в поверхностный слой изделия: а – изменение толщины **x** диффузионного слоя во времени; б – то же в зависимости от температуры; изменение содержания С диффундирующего элемента по глубине слоя: 1 – C_{01}; 2 – C_{02} (C_0 – начальное содержание элемента у поверхности)*

2.5.2. Виды ХТО

Различают несколько видов ХТО: цементация, азотирование, алитирование, силицирование, борирование стали. Наибольшее распространение получили цементация и азотрование. Цементация стали – технологический процесс насыщения поверхности стальных деталей углеродом. При цементации концентрация углерода в поверхностных слоях достигает 0,8…1 %. Поэтому с помощью цементации обрабатывают детали, изготовленные из низкоуглеродистых марок стали. После цементации сердцевина детали остается вязкой. Если детали имеют поверхности, не подлежащие ХТО, то их защищают, например, с помощью меднения. Цементации обычно подвергаются детали, которые должны иметь износоустойчивую поверхность и вязкую сердцевину. Такое распределение свойств позволяет получить детали, хорошо работающие на удар.

Цементацию проводят, как правило, в твёрдых и газообразных средах. Эти среды называются карбюризаторами. В качестве твердого карбюризатора используется древесный уголь и кокс. Ящик накрывают

крышкой, кромки которой обмазывают огнеупорной глиной. После этого в ящик помещают в печь. Здесь его нагревают до температуры 910…930 °С. При этом образуется устойчивый аустенит, растворяющий углерод в больших количествах. При цементации атомы углерода проникают в решетку Fe γ. Выдержка в печи определяется требуемой глубиной цементируемого слоя. После цементации ящики охлаждают на воздухе до температуры 400…500 °С и затем раскрывают.

При газовой цементации изделия нагревают в среде газов, содержащих углерод. Процесс идет значительно быстрее чем в твердом карбюризаторе. Кроме того, появляется возможность полностью механизировать и автоматизировать процесс. Наиболее высокое качество цементации достигается в среде природного газа метана (CH_4), а также в среде жидких углеводородов. Окончательные свойства цементируемых деталей получают в результате термической обработки, которую выполняют после цементации. За счет измельчения зерна при такой обработке повышаются показатели прочности. Обычно глубина цементируемого слоя 0,5…2,0 мм. Однако твердость цементированного слоя сохраняется только до температуры 200…250 °С.

Азотирование стали - насыщение поверхностного слоя стали азотом. Азотирование значительно повышает твердость поверхностного слоя увеличивает его износоустойчивость, повышает предел выносливости и стойкость к коррозии в среде атмосферы, воды и пара. Твердость азотированного поверхностного слоя значительно выше, чем у цементированной стали, и сохраняется до 550…600 °С. Толщина азотированного слоя обычно составляет 0,3… 0,6 мм. Азотирование проводят в атмосфере аммиака (NH_3), который при нагреве диссоциирует, разделяясь на атомарные азот и водород. Атомарный азот проникает в железо.

Кроме рассмотренных видов ХТО применяют нитроцементацию, алитирование, хромирование, силицирование и борирование.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику железа.
2. Как проявляется полиморфизм железа? Приведите кривую охлаждения чистого железа.
3. Приведите диаграмму состояния железо-углерод. Чем обусловлено большое количество фаз для сплавов железа с углеродом?
4. Приведите основные свойства и микроструктуру феррита, аустенита, перлита.

5. Приведите основные свойства и микроструктуру цементита, ледебурита, графита.
6. Чем отличается сталь от чугуна?
7. Классифицируйте стали по содержанию углерода.
8. Как влияет содержание углерода на механические свойства стали?
9. Какие вредные примеси могут быть в стали?
10. В чем заключаются основные превращения в стали при нагревании и охлаждении?
11. Опишите механизм превращения перлита в аустенит.
12. Опишите механизм превращения аустенита в перлит при медленном охлаждения.
13. Опишите механизм превращения аустенита в мартенсит при высоких скоростях охлаждения.
14. Механизм превращения мартенсита в перлит.
15. Приведите зависимость температур начала и конца мартенситного превращения от содержания углерода в стали.
16. Назовите основные виды термической обработки.
17. Недостаток закалки стали в одном охладителе?
18. Для каких изделий применяют закалку стали в двух средах? Укажите недостаток этого метода.
19. Для каких сталей используется изотермическая закалка?
20. Режим закалки с самоотпуском. Для каких изделий применяется этот вид закалки?
21. Назначение и режимы отпуска и искусственного старения стали.
22. Какими факторами определяется кинетика диффузионных процессов?
23. В чем заключается процесс цементации и азотирования стали?

Глава III. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

3.1. Стали и сплавы

Широкое применение сталей в различных отраслях обусловлено сочетанием ценного комплекса их механических, теплофизических, химических, магнитных и других свойств. Номенклатура сталей, используемых в приборостроении достаточно велика. Разработана информационная система маркировки, отражающая состав, технологию получения и структуру сталей различных видов.

Сталь - сплав железа с углеродом (до 2 % С). По химическому составу сталь разделяют на углеродистую и легированную. По качеству - на сталь обыкновенного качества, качественную, повышенного качества и высококачественную.

3.1.1. Углеродистые стали обыкновенного качества

Углеродистые стали обыкновенного качества характеризуются значительным содержанием вредных примесей, неметаллических включений, газов. Стали обыкновенного качества выпускаются преимущественно в виде проката. Маркируют их буквами Ст и цифрами. Цифры - условный номер марки в зависимости от химического состава. Углеродистую сталь обыкновенного качества изготовляют следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп. Буквы "кп", "пс", "сп" обозначают степень раскисления ("кп" - кипящая, "пс" - полуспокойная, "сп" - спокойная).

3.1.2. Углеродистые качественные стали

Углеродистые качественные конструкционные стали имеют меньшее по сравнению со сталями обыкновенного качества содержание вредных примесей и неметаллических включений. Эти стали по видам обработки при поставке делятся на горячекатаную и кованую, калиброванную, круглую со специальной отделкой поверхности - серебрянку. *Маркируют двухзначными цифрами 05, 08, 10, 20..85, характеризующими содержание углерода в сотых долях процента.* Например, сталь 40 содержит 0,4 % углерода. Стали этой группы изготавливают без термической обработки, термически обработанными и нагартованными. Их применяют в машиностроении и приборостроении для изготовления методом штамповки корпусов, кожухов (Ст08кп, Ст05кп, Ст10кп), сварных конструкций, резервуаров, емкостей, труб средней прочности (Ст08сп, Ст10сп), малонагруженных зубчатых колес, кулачков, осей

(Ст10, сталь20, сталь25). Термическая обработка позволяет использовать эти стали для изготовления деталей, испытывающих циклические нагрузки (стали 40,45, 55, 60). Стали с повышенным содержанием углерода и марганца (65, 70, 75, 80, 60Г, 65Г, 70Г) применяют в качестве рессорно-пружинных.

Инструментальные углеродистые стали обозначают буквой У с указанием на среднее массовое содержание углерода в десятых долях процента. Например, в стали У12 содержится около 1,2% углерода. Сталь У12А высококачественная. Некоторые виды режущих инструментов работают в тяжелых условиях, и для них созданы стали с условным названием “быстрорежущие”. Их маркируют буквой Р, которую ставят в начале обозначения марки. Например, быстрорежущая сталь Р6М5 содержит 6 % вольфрама и 5 % молибдена.

3.1.3. Легированные стали

Легированной называют сталь, в которую введены специальные элементы для получения требуемых свойств. Легированную сталь по степени легирования разделяют на низколегированную (легирующих элементов до 2,5 %), среднелегированную (от 2,5 до 10 %), высоколегированную (от10 до 50 %). В зависимости от основных легирующих элементов различают сталь 14 групп.

К высоколегированным сталям относят: коррозионностойкие (нержавеющие) стали и сплавы, обладающие стойкостью против электрохимической и химической коррозии; межкристаллитной коррозии, под напряжением и др.; жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения в газовых средах при температуре выше 50°С, работающие в ненагруженном и слабонагруженном состоянии; жаропрочные стали и сплавы, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и, обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

Маркировка легированных сталей

Для обозначения марок легированных сталей используют цифры и буквы.

Пример: сталь 12Х2Н4А содержит углерода – 0,12%, хрома – 2%, никеля – 4%; А – высококачественная сталь.

Буквенные обозначения элементов: Б – ниобий, Р – бор, В – вольфрам, Т – титан, Г – марганец, С – кремний, Д – медь, Ф – ванадий, К – кобальт, Х – хром, М – молибден, Ц – цирконий, Н – никель, Ю – алюминий, П – фосфор, Ч – редкоземельные.

Благодаря введению легирующих элементов можно сформировать в стали требуемые свойства [13]: коррозионную стойкость, жаропрочность, жаростойкость, твёрдость, ударную вязкость, износоустойчивость. На рис. 3.1 показано влияние легирующих элементов на предел прочности феррита, содержащего менее 0,02 % углерода.

Сталь легированную конструкционную в зависимости от химического состава и свойств делят на качественную, высококачественную А, особовысококачественную Ш (электрошлакового переплава). По видам обработки при поставке различают сталь горячекатаную, кованую, калиброванную, серебрянку. По назначению изготовляют прокат: а) для горячей обработки давлением и холодного волочения (подкат); б) для холодной механической обработки.



Рис. 3.1. Зависимость $\sigma_в$ стали от содержания легирующих элементов феррите

3.1.4. Электротехническая сталь

Электротехническую тонколистовую сталь разделяют [9]:

• по структурному состоянию и виду прокатки на классы: 1 - горячекатаная изотропная; 2 - холоднокатаная изотропная; 3 - холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой;

• по содержанию кремния: 0 - до 0,4 %; 1 - св. 0,4 до 0,8 %, 2 - св. 0,8 до 1,8 %; 3 - св. 1,8 до 2,8 %; 4 - св. 2,8 до 3,8 %; 5 - св. 3,8 до 4,8 %, химический состав стали не нормируется;

• по основной нормируемой характеристике на группы: 0 - удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц (Р1,7/50); 1 - удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц (Р1,5/50); 2 - удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц (Р1,0/400); 6 - магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м (В 0, 4); 7 - магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (В10).

3.2. Медь и сплавы на ее основе

3.2.1. Свойства меди и классификация медных сплавов

Медь **–** металл красновато – розового цвета с кристаллической структурой в виде ГЦК. По электропроводности медь занимает второе место после серебра. Поэтому медь является важнейшим материалом для изготовления электропроводников (проводов, шин, кабелей и т.п.). Медь также имеет высокую теплопроводность, в связи с чем широко применяется в теплообменниках (радиаторы, холодильники и т.п.). Медь и ее сплавы хорошо свариваются всеми видами сварки и легко поддаются пайке. На основе меди получены сплавы с очень ценными свойствами. Однако медь относится к тяжелым металлам, ее плотность 8940 кг/м^3. Медь отлично обрабатывается давлением, но плохо резанием и имеет плохие литейные свойства, поскольку дает большую усадку. Чистую медь и ее малолегированные сплавы широко используют в электротехнике, электронике и других отраслях.

Медь выпускают следующих марок (ГОСТ 859 –2001): катодную – МВ4к, М00к, М0ку, М1к; бескислородную – М00б, М0б, М1б; катодную переплавленную – М1у; раскисленную – М1р, М2р, М3р. По содержанию примесей различают марки меди М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М1(99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu).

По составу медные сплавы подразделяют на: латуни, бронзы, медно-никелевые сплавы.

3.2.2. Латуни

Латунь (ГОСТ17711 – 93)– сплав меди с цинком. Помимо Zn в латунь добавляют различные легирующие элементы. Химические элементы, используемые в медных сплавах, обозначаются следующими индексами в марке сплавов: **Al** – А; **Ba** – Бр; **W** – ВАМ, Внм, Вэл; **Bi** – Ви; **V** – В; **Cd** – Гм; **Ga** – Гл; **Ge** – Г; **Fe** – Ж; **As** – Мш; Ni- Н; **Sn** – О; **Pb** – С; **P** – Ф; **Co** – К(Ко); **Au** – Зл; **Si** – Кр (К); **Mg** – Мг; **Mn** – Мц; **Cu** – М; **Se** – Ст; **Ag** – Ср; **Sb** – Су; **Tu** – Ти; **Zn** – Ц.

Все латуни по технологическому признаку подразделяют на две группы: деформируемые, из которых изготавливают листы, трубы, проволоку и другие полуфобрикаты, и литейные – для фасонного литья. Литейные латуни обладают хорошей жидкотекучестью и обладают хорошими антифрикционными свойствами.

Двойные латуни маркируют буквой Л и цифрами, показывающими содержание меди (остальное цинк). Например, Л90 – Cu 90 %; Zn10 %. Латуни перерабатывают в изделия: обработкой, давлением, литьём, резанием. Латуни хороший конструкционный материал.

Алюминиевые латуни имеют повышенные механические характеристики и коррозионную стойкость. ЛА 85 – 0,5 (Cu – 85 %; Al – 0,5 %, остальное – Zn).

Многокомпонентные латуни: ЛАНКМЦ 75 – 2 – 2,5 – 0,5 – 0,5 (Cu – 75 %; Al – 2 %; Ni – 2,5 %; Si – 0,5 %; Mn – 0,5 %, остальное Zn).

Марганцевые латуни обладают высокими механическими свойствами, обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии, стойки к коррозии. ЛМЦ 58 – 2; Cu – 58% (Mn – 2 %; Zn – 40 %).

Свинцовые латуни обладают антифрикционными свойствами, обрабатываются резанием. Марки: ЛС 63 – 3; ЛС 74 – 3.

Кремнистые латуни обладают высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и в морской воде. Марки: ЛК80 – 3; ЛКС65–1,5– 3.

Практическое применение находят латуни с содержанием Zn до 48 %.

3.2.3. Бронзы

Бронзы – сплавы меди, основными компонентами которых являются: олово, алюминий, бериллий, кремний, свинец и др.

Бронзы обозначают буквами Бр и цифрами, аналогично маркировке латуней.

Литейные бронзы – содержат до 6 % Sn, их используют для изготовления деталей ответственных углов трения. *Оловянные бронзы* (ГОСТ 613 – 79) обладают высокими антифрикционными свойствами, нечувствительны к перегреву, морозостойки, немагнитны. Например, бронза БРОЦСН – 3 – 7 – 5 – 1 имеет следующий состав: Sn – 3%; Zn – 7 %; Pb – 5 %; Ni – 1 %, остальное Cu. Недостаток оловянных бронз – склонность к образованию пор в отливках, малая жидкотекучесть.

Деформированные оловянные бронзы содержат до 80% Sn, из них изготовляют пружины и деформируемые детали. Бериллиевая бронза БрБ2 обладает хорошими упругими свойствами, из неё изготовливают пружины.

3.2.4. Сплавы меди с никелем

Медно-никелевые сплавы являются основными сплавами для изготовления технических резисторов (мельхиор, нейзильбер). В качестве жаростойких сплавов для работы при температуре не выше 400 – 500 °С можно применять медно-никелевые сплавы типа *константан*, содержащие 40 – 50 % Ni. В указанном диапазоне температур они достаточно жаростойки, имеют высокое электрическое сопротивление при малом его температурном коэффициенте.

Сплавы меди с никелем и другими легирующими элементами – это бронзы особого вида: мельхиор, нейзильбер, копель и др.

Мельхиор – МНЖМц 30 – 1 – 1 (Ni и Co 29 – 33 %; Fe 0,5 – 1 %; Mn 0,5 – 1 %, остальное Cu).

Нейзильбер – МНЦС 16 – 29 – 1,8 (Ni и Co 15 – 16,7 %; Pb 1,6 – 2 %; Cu 51 – 55 %, остальное Zn).

Копель - Ni и Co 44 % , Mn 0,1 – 1 %, остальное Cu.

Куниали – МНА13-3, МНА6 – 1,5. *Манганин* - МНЦ18 – 20.

3.3. Алюминий и его сплавы

3.3.1. Свойства алюминия и классификация алюминиевых сплавов

Температура плавления чистого алюминия равна 660 °С, алюминий имеет ГЦК решетку и температурным полиморфизмом не обладает. При нормальной температуре его плотность ρ=2700 кг/м^3. По величине электропроводности алюминий среди металлов находится на четвертом месте (после серебра, золота и меди). При 25 °С его электропроводность равна 65 % от электропроводности международного эталона отожженной меди.

Механические свойства алюминия типичны для чистых металлов с ГЦК решеткой: он имеет низкую прочность (σ_B=40 МПа) и высокую пластичность (δ=50%). Модуль упругости E=70 ГПа.

Поверхность алюминия покрыта сплошной тонкой (до 5 нм) и прочной оксидной пленкой Al_2O_3, имеющей хорошее сцепление с металлом и защищающей алюминий от атмосферной коррозии.

По объему производства алюминий и сплавы на его основе занимают первое место среди нежелезных металлических материалов. Это обусловлено тем, что алюминиевые сплавы отличаются уникальным комплексом свойств: низкой плотностью, высокой удельной прочностью (σ_B/ρ), хорошей коррозионной стойкостью во многих средах и высокой технологичностью (их плавят и обрабатывают давлением при невысоких температурах в воздушной атмосфере).

Первичный алюминий (ГОСТ 11069-74 (1-Х-76), (2-III-80), (3-II-85), (4-VIII-87), (5-I-88), (6-VII-89), (7-XII-92)) маркируют буквой А, за которой следуют цифры, указывающие десятые, сотые или тысячные доли процента содержания алюминия. Например, алюминий марки А995 содержит не менее 99,995 % Al, марки А99 – 99,99 % Al, марки А7 – 99,7 % Al и марки А0 – 99,0 % Al. Металлургические заводы выпускают алюминий трех сортов: особой чистоты (А999), высокой чистоты (А995, А99, А97, А95) и технической чистоты (А85, А8, А7, А6, А5, А0).

Основные примеси в первичном алюминии – железо и кремний. Например, алюминий марки А7 содержит не более 0,16 % Fe и 0,16 % Si и не более 0,30 % суммы всех примесей.

Для повышения прочности алюминий легируют разными элементами. Ни с одним из элементов периодической системы алюминий не образует непрерывный ряд твердых растворов. Всего лишь 9 элементов имеют предельную растворимость в твердом алюминии в количестве более 1,5 % (по массе): Zn 82,8; Ag 55,6; Ga 20,0; Mg 17,4; Ge 6,0; Cu 5,7; Li 4,2; Mn 1,82; Si 1,65. За исключением остро дефицитных серебра, галлия и германия, все эти элементы образуют с алюминием двойные системы эвтектического типа.

Алюминиевые сплавы подразделяют на деформируемые и литейные (рис. 3.2). Из деформируемых сплавов методом полунепрерывного литья получают круглые и плоские слитки, которые подвергают горячей и холодной обработке давлением (прессованию, прокатке, ковке, штамповке и т.п.).

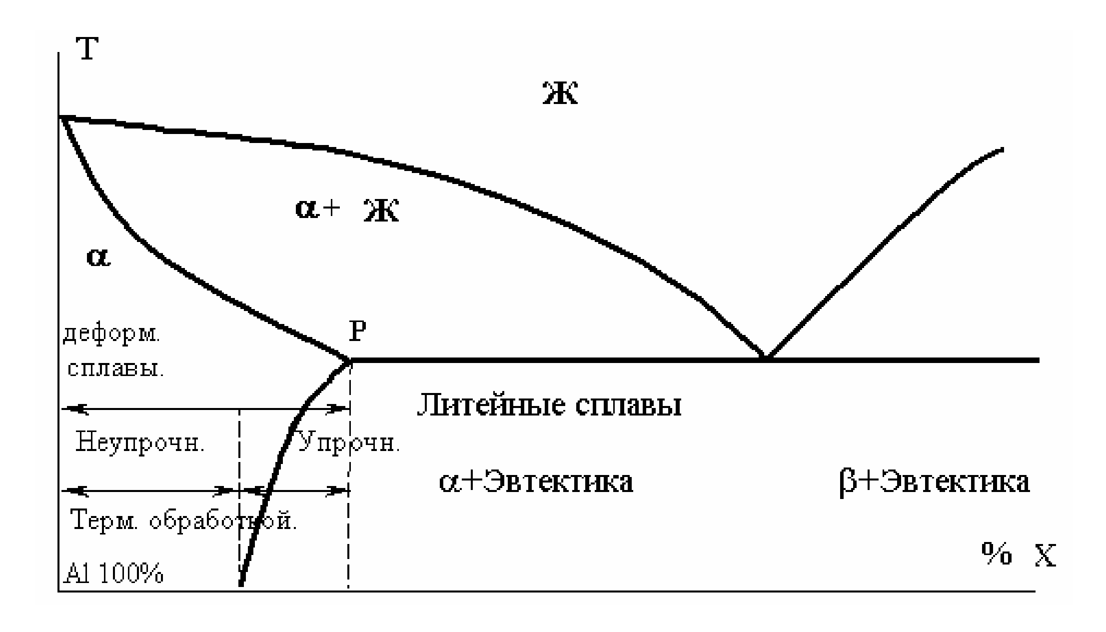


Рис. 3.2. Диаграмма состояния сплавов алюминия

Для обозначения промышленных деформируемых сплавов используют исторически сложившуюся буквенно-цифровую и буквенную маркировку, причем цифры в марке чаще всего не обозначают концентрацию легирующих элементов. Позднее была введена единая маркировка из четырех цифр. Первая цифра во всех марках обозначает основу сплава – алюминий. Вторая цифра в марке несет главную смысловую нагрузку, указывая систему, являющуюся основой данного сплава: 0 –

технический алюминий, 1 – система Al-Cu-Mg, 2 – системы Al-Cu-Mn и Al-Li, 3 – системы Al-Mg-Si и Al-Mg-Si-Cu, 4 – система Al-Mn, 5 – система Al-Mg, 9 – системы Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu. Цифры 6,7 и 8 – резервные для возможных новых систем. Последние две цифры в марке указывают порядковый номер сплава. В ГОСТ 4784-97 дано традиционное буквенное и, параллельно, цифровое обозначение марки. Новым сплавам присваивают только цифровое обозначение.

Литейные сплавы, предназначенные для отливки фасонных деталей в песчаные формы, кокиль, методом литья под давлением и другими способами, должны обладать хорошими литейными свойствами: высокой жидкотекучестью, сопротивляемостью образования горячих трещин, малой склонностью к образованию рассеянной пористости. Для этого они должны иметь небольшой интервал кристаллизации и содержать достаточно большое количество эвтектической жидкости, кристаллизирующейся при постоянной температуре или в узком интервале температур.

Литейные алюминиевые сплавы в соответствии с ГОСТ 1583-93 маркируют буквой А, за которой следуют буквы, обозначающие легирующий элемент: К-Si, М-Cu, Мг-Mg, Н-Ni, Кд-Cd. Цифры после обозначения элемента указывают среднее его содержание. Если концентрация элемента не превышает 1,5 %, то после его обозначения цифры не проставляют. Во многих сплавах магний, являющийся одним из основных компонентов, содержится в десятых долях процента; в марках этих сплавов его обозначение отсутствует. Буквы ч и пч в конце марки (чистый, повышенной чистоты) указывают на пониженное содержание примесей.

3.3.2. Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы (Al – Si; Al – Cu; Al – Mg) отличаются повышенным содержанием легирующих элементов, а эвтектическая структура (15 – 20 %) обеспечивает жидкотекучесть и более низкие температуры плавления. Главное достоинство – жидкотекучесть, небольшая усадка, хорошие механические свойства, сопротивление коррозии. Металл должен обладать жидкотекучестью, чтобы заполнить всё пространство литейной формы.

Лучшие литейные свойства у сплавов Al – Si – силумины.

Силумины – обладают высокой коррозионной стойкостью. Типичным преставителем силуминов является сплав АЛ2 (Si – 10,13 % , $\sigma_в$ = 180 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 90 МПа). Структура близка к эвтектической. Хорошо обрабатывается резанием, сваривается.

Мангалины Al – Mg (АЛ8, АЛ27, АЛ29). Для этих сплавов характерна высокая стойкость к коррозии, прочность, обрабатываемость резанием. Литейные свойства невысоки, так как сплав не содержит эвтектики.

Для подшипников изготавливаются специальные алюминиевые сплавы: АСМ (0,5 % Mg; 3 – 5 % Sb); АСС – 6 – 5 (0,5 % Mg, 5 – 6 % Sb,4 – 5 % Pb).

3.3.3. Спечённые алюминиевые порошки

Спечённые алюминиевые порошки получают методом порошковой металлургии. Они не входят ни первую, ни во вторую группу, это обособленная группа [10]. Это соединение $Al+Al_2O_3$ (Al_2O_3 от 6 до 22 %). Порошок получают из технически чистого алюминия – распылением в азоте с последующим измельчением. Чешуйчатые частицы алюминия в процессе разлома покрываются тонкой плёнкой оксида, толщиной 0,01 – 0,1 мкм, т. е. алюминий в воздухе быстро покрывается оксидной плёнкой Al_2O_3, что предохраняет его от коррозии.

Марка	Al_2O_3, %	$\sigma_т$, МПа
САП – 1	6 – 9	220
САП – 2	9 – 13	280
САП – 3	13 – 17	320
САП – 4	18 – 23	370

3.3.4. Спечённые алюминиевые сплавы

Спеченные алюминиевые сплавы получают из порошков алюминия с небольшим содержанием Al_2O_3, легированных Fe, Ni, Cu, Mn, и др. Например, САС – содержит 25 – 30 % Si и 7 % Ni. Изготовление полуфабрикатов из материала САС – 1 включает в себя несколько технологических процессов: приготовление высококремнистого сплава для последующего распыления; его распыление (пульверизация) сжатым газом с помощью форсунок; изготовление из порошков полуфабрикатов методом гидростатического прессования.

Достоинства САС – 1 заключается в низком и стабильном коэффициенте линейного температурного расширения, что очень важно при малой величине зазора газостатического подвеса. Сплавы типа САС – 1 не склонны к межкристаллизационной коррозии. Их защита от общей коррозии осуществляется анодированием в серной кислоте с наполнением пленки в растворе бихромата калия. Они хорошо поддаются меха-

нической обработке: точению, фрезерованию, сверлению, полированию с обеспечением точности изготовления до долей микрометра [1]. Использование этих сплавов в качестве конструкционных материалов позволяет значительно уменьшить массу гиропиборов.

3.3.5. Общая характеристика видов термической обработки алюминиевых сплавов

Большое разнообразие структур, которые могут быть получены в изделиях из алюминиевых сплавов после термообработки, является результатом различного отклонения состояния сплавов от термодинамически равновесного при комнатной температуре.

Термической обработкой можно достичь большого разнообразия структур (и свойств) и в сплавах, не имеющих фазовых превращений в твердом состоянии при нагреве и охлаждении, но только тогда, когда исходное неравновесное состояние получено либо при литье, либо при обработке давлением. В этих случаях изменение структуры при термообработке необратимо.

Для алюминиевых сплавов широкое распространение получили три вида термообработки: отжиг, закалка и старение.

Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой: Al – Mn; Al – Mg.

Высокая пластичность, свариваемость, коррозионная стойкость. Границей деформируемых и литейных алюминиевых сплавов служит предел насыщения твёрдого раствора при температуре эвтектики (точка Р рис. 10.1).

Деформируемые сплавы после обработки давлением подвергают технической обработке. По своим механическим свойствам они превосходят литейные сплавы.

Алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой, подразделяют на: сплавы нормальной прочности, высокопрочные сплавы, жаропрочные сплавы, сплавы для ковки и штамповки.

Типичным представителем сплавов нормальной прочности являются дуралюмины, относящиеся к системе Al – Cu – Mg, которые обозначаются буквой Д. Марганец повышает коррозионную стойкость, температуру рекристаллизации и улучшает механические свойства дуралюминов. Для упрочнения сплавов применяют закалку: Д1; Д18 - 450 – 505 °С; Д16 490 – 500 °С с охлаждением в холодной воде.

Дуралюмины широко используют в авиации: Д1 – лопатки винтов, Д16 – элементы фюзеляжа, Д18 – основной заклёпочный материал.

Высокопрочные сплавы: Al – Zn – Mg – Cu (В95; В96).
Закалка при температуре 406 – 480 °С. Искусственное старение при 120 – 190 °С, 16 часов. Температура эксплуатации $t_{эксп}$ = 90 + 120 °С.

Жаропрочные сплавы - АК – 4; АК4 – 1. Температура эксплуатации $t_{эксп}$ до 300 °С. *Используют после закалки и старения, легированы Cu, Fe, Ni, Mn, Ti.*

Сплавы для ковки и штамповки - обладают высокой пластичностью. Штамповка при температуре 450 – 475 °С.

3.4. Титан и его сплавы

Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, достаточное распространение в природе способствует расширению области использования титана в качестве конструкционного материала.

Титан обладает высокой стойкостью к воздействию окислительных и коррозионных сред благодаря образованию на поверхности прочной оксидной пленки. В большинстве сплавов титана присутствует алюминий.

Титановые сплавы классифицируют по технологии переработки (литейные и деформируемые); механическим свойствам (нормальной прочности, высокопрочные, повышенной пластичности); по отношению к термической обработке (упрочняемые и неупрочняемые термически); жаропрочные и т.д. В приборостроении сплавы на основе титана применяют для изготовления корпусных деталей, рамок приборов ориентации и навигации летательных аппаратов и т.д.

К группе более прочных сплавов титана относят ВТ-5, ВТ-6, ВТ-16, ВТ-20. Временное сопротивление $\sigma_в$ этих сплавов достигает 1200 МПа. Их поставляют в форме листов, штамповка которых выполняется с подогревом (800…900). Сплав ВТ-6 относится к системе Ti- Al- V, сплав ВТ-16 – к системе Ti – Al – Mo – V. Сплав ВТ – 5 представляет систему Ti – Al. Все эти сплавы применяют в термически обработанном состоянии – отожженном или закаленном и искусственно состаренном.

Большую группу составляют литейные титановые: ВТ3-1Л, ВТ5-Л, ВТ14Л, ВТ6Л, ВТ9Л. Буква Л в маркировке сплава означает – “Литейный”.

Титан образует сплавы на основе интерметаллических соединений, в которых титан вступает в химическое соединение с другим металлом. Среди таких сплавов выделяется сплав на основе TiNi, называемый нитинолом. Этот сплав обладает, так называемым, эффектом памяти формы. Он способен воспроизводить заданную форму изделия при определенном тепловом воздействии.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику углеродистым сталям обыкновенного качества. Маркировка. Область применения.
2. Чем отличаются углеродистые качественные стали от углеродистых сталей обыкновенного качества? Маркировка. Область применения.
3. Какими элементами, и с какой целью легируют стали?
4. Определите состав стали, её свойства и область применения по марке: 40Х12Н8Г8МФБ, 13Х, 70С3А, 20Х13, 45, У10А, Ст5кп.
5. Свойства меди. Область применения. Марки меди по Гост859.
6. Назовите известные Вам сплавы на основе меди. Маркировка медных сплавов. Свойства и область применения на основе меди.
7. В чём причина высокой жидкотекучести литейных алюминиевых сплавов?
8. В какой форме поставляются деформируемые алюминиевые сплавы?
9. Определите состав сплава и возможную область применения по марке: Л85; ЛС63-3; ЛАЖ60-1-1; БрЩФ4-0,25; БрАЖ9-4; БрБ2; МНЦС16-9-1,8
10. Определите по марке, к какой группе относятся сплавы: АЛ2, АМг5, Д16, Д16Т. Укажите возможную область применения этих сплавов.
11. Структура, состав, свойства и область применения спечённых алюминиевых порошков (САП).
12. Структура, состав, свойства и область применения спечённых алюминиевых сплавов (САС).
13. Титановые сплавы, свойства и область применения.

Глава IV. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. Пластические массы и резины

Пластмассы – искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ.

Достоинства пластмасс:

- низкая плотность (ρ = 0.9…3 т/ м^{3}),
- прочность силовых пластиков сопоставима с прочностью стали,
- пластмассы имеют хорошие технологические свойства,
- хорошие электроизоляционные свойства,
- высокая химическая стойкость,
- фрикционные и антифрикционные свойства.

Недостатки пластмасс:

- невысокая теплостойкость,
- низкий модуль упругости,
- склонность к старению.

По происхождению полимеры разделяют на *природные* и *синтетические*. Типичными представителями природных полимеров являются целлюлоза, крахмал, натуральный каучук, слюда, асбест. *Природные полимеры* образуются в процессе биосинтеза в клетках живых организмов. Их выделяют с помощью экстракции (вытяжки, перевода в другое вещество), фракционного осаждения из растительного и животного сырья. Однако в промышленности природные полимеры используют мало.

Синтетические полимеры представляют собой продукт синтеза (целенаправленного получения сложных веществ из более простых), основанного на знании молекулярного строения и реактивной способности. Номенклатура синтетических полимеров постоянно расширяется.

4.1.1. Классификация полимеров

Все полимеры можно разделить по составу на две основные группы: органические и неорганические.

Органические полимеры – наиболее обширная группа соединений. Смолы и каучуки являются органическими полимерами. К органическим полимерам относят соединения, молекулы которых содержат атомы углерода, водорода, азота, кислорода, серы, галогенов, входящие в состав главной цепи и боковых групп.

Неорганические полимеры – это соединения, которые не содержат в составе макромолекул атомов углерода.

В процессе получения полимерного соединения мономерные зве-

нья выстраиваются в определенную цепь. По характеру строения полимерных цепей различают полимеры линейного, разветвленного и сетчатого строения (рис. 4.1).

Линейные макромолекулы (рис. 4.1, а) представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки.

Разветвленные макромолекулы (рис 4.1, б) определяют меньшую прочность и повышенную легкоплавкость, а также растворимость полимера. Это происходит потому, что разветвленная форма макромолекул препятствует их сближению, что и определяет пониженное межмолекулярное взаимодействие, а, следовательно, и пониженную прочность.

Макромолекула ленточная или лестничная состоит из двух цепей, соединенных химическими связями (рис. 4.1, в). Лестничные полимеры обладают повышенной теплопроводностью, большей жесткостью, они нерастворимы в стандартных органических растворителях.

Пространственные или сетчатые полимеры получают при соединении (сшивке) макромолекул между собой в поперечном направлении (рис. 4.1, г). Пространственные полимеры лежат в основе конструкционных неметаллических материалов. К полимерам этого типа относятся также паркетные или пластинчатые структуры (рис. 4.1, г). Примером такого полимера является графит.

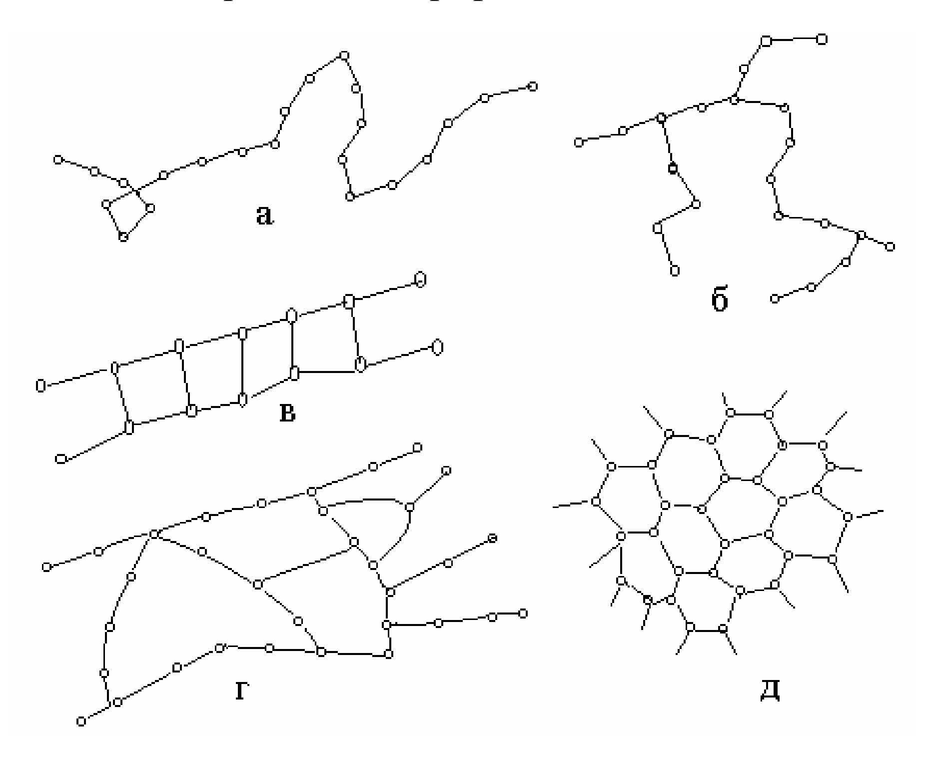


Рис. 4.1. Формы макромолекул

По фазовому состоянию полимеры подразделяют на аморфные и кристаллические.

Аморфные полимеры построены из цепных молекул, которые собраны в клубки или пачки. Эти структуры считаются недолговечными, отчего с течением времени свойства аморфных полимеров могут изменяться.

Кристаллические полимеры характерны тем, что при определенных условиях в их структуре образуются пространственные решетки кристаллов. Например, полиэтилен является кристаллизующимся полимером. В некоторых случаях могут встречаться комбинации кристаллических и аморфных полимеров.

Полимерные материалы изменяют свои свойства под воздействием температуры. По этому признаку различают термореактивные и термопластичные полимеры.

Термопластичные полимеры (термопласты) обладают свойством многократно переходить при нагревании в состояние расплава. Термопласты удобны в обработке, дают незначительную усадку при формировании (1 – 3 %).

Термореактивные полимеры (реактопласты) при нагревании выше определенных, характерных для данного типа полимера, температур, становятся неплавкими и практически нерастворимыми. После отверждения они хрупки, часто дают большую усадку (10 – 15 %), поэтому их усиливают наполнителями.

4.1.2. Состав пластмасс

1. *Связывающее вещество* – смолы, эфиры, целлюлозы.
2. *Наполнитель* (*арматура*) – вводят в состав пластмасс для формирования дополнительных свойств (механических, электрических и др.).
3. *Пластификатор* – вводят для повышения эластичности и облегчения обработки (олеиновая кислота, стеарин, дибутилфталат).
4. *Отвердитель* – предназначен для ускорения процесса отверждения термореактивных связующих.
5. *Красители* - для придания пластмассе декоративного вида. Красителями могут быть минеральные пигменты или спиртовые растворы органических красок.

4. Специальные добавки – применяют для придания пластмассам особых свойств. В качестве их используют смазочные материалы, добавки для уменьшения статических зарядов и горючести, для защиты от плесени и других видов микробиологической коррозии.

По виду наполнителя пластмассы делятся на:

- порошковые (тальк, графит, древесная мука);
- волокнистые (очёсы хлопка, льна, асбест, стеклянные волокна);
- слоистые (листы бумаги в гетинакс, хлопчатобумажные листы, асбестовые, стеклянные ткани в текстолите, стеклотекстолите);
- газонаполненные.

4.1. 3. Термопласты

Полиэтилен – продукт полимеризации бесцветного газа этилена (рис. 4.2). В зависимости от условий полимеризации (давления, вида катализатора, температуры) получают продукт с различной молекулярной массой. Различают полиэтилен высокого давления (низкой плотности) с молекулярной массой 80000…500000 (ПЭВД), полиэтилен низкого давления – 80000 … 3000000 (ПЭНД), полиэтилен среднего давления – 300000 … 400000 (ПЭСД), высокомолекулярный полиэтилен низкого давления с молекулярной массой 2000000 …3500000 (СВМПЭ).

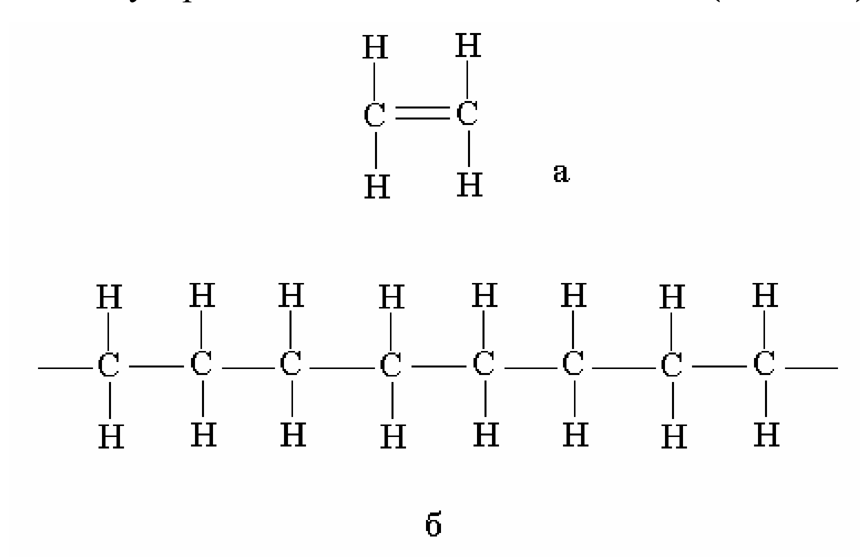


Рис. 4.2. Структура макромолекулы: а – этилен C_2H_4;
б - полиэтилен C_2H_{4n}

Необходимо отметить, что классификация полиэтиленов по давлению в процессе их синтеза или по плотности не полностью отражает свойства получаемого продукта. Поэтому при характеристике полиэтилена целесообразно указывать его плотность и давление синтеза.
Температурный диапазон эксплуатации полиэтилена от –70 до + 60°С. +100 °С. Морозостойкость полиэтилена достигает – 70 °С. Полиэтилен химически стоек, не растворим при t = +20 °С ни в одном из известных растворителей, однако недостаточно стоек к маслам и жирам.

Существенный недостаток полиэтилена – подверженность ста-

рению. Изготавливают полиэтиленовые трубы, плёнки, чехлы. Для изготовления деталей из полиэтилена применяют литье под давлением, экструзию, вакуумформование. Полиэтилен хорошо сваривается. Благодаря своим свойствам полиэтилен находит широкое применение в изделиях медицинского назначения.

Полипропилен – производная полиэтилена. Имеет хорошие механические свойства, но очень низкую морозостойкость.

Полистирол – твёрдый, жёсткий, термопластичный полимер. Хорошо окрашивается. Обладает хорошими диэлектрическими свойствами, очень мало поглощает влагу, обладает хорошей прозрачностью. Недостатки полистирола - склонность к старению и образованию трещин. Из полистирола литьём под давлением и экструзией изготавливают ручки, детали радиотехники и приборов.

Фторопласты. Название этот термопласт получил от того, что в цепь полимера входит фтор. Это высококачественный диэлектрик (изоляционные трубочки, прокладки). Стоек к действию кислот, щёлочей, растворителей, окислителей.

Фторопласт – 4 , например, можно эксплуатировать до температуры t_{max} = + 250 °C. Достоинства: обладает низким коэффициентом трения, негорюч, стоек к маслам, топливу. К его недостаткам относится низкая твёрдость и высокая стоимость. *Фторпласт* – 4 применяют для изготовления прокладок, уплотнительных колец, подшипников, втулок. Изготавливают также металлофторопластовые покрытия, которые практически не требуют смазки.

Органическое стекло – прозрачный термопласт. Чаще всего применяют *полиметилметакрилат*. Он более чем в два раза легче минеральных стёкол. *Полиметилметакрилат* получают полимеризацией *метилметакрилата*, которая происходит при определённой температуре в специальных формах, из которых потом извлекают готовую продукцию – листы, блоки. Для улучшения прозрачности из массы, приготовленной для полимеризации, удаляют пузырьки воздуха вакуумированием в специальных вакуумных камерах.

Полиметилметакрилат хорошо окрашивается, обладает светопрозрачностью толщиной до 24 мм. При нормальной температуре устойчив к воздействию воды, разбавленных кислот и щелочей, спиртов и масел.

Отходы оргстекла хорошо утилизируются, поскольку при температуре + 300 °C деполимеризуются с образованием мономера, который может быть снова употреблён для получения полиметилметакрилата. Высокие электроизоляционные свойства, химическая стойкость, хоро-

шая светопрозрачность определили применение этого материала в приборах, в медицинской промышленности, при протезировании, в светотехнической промышленности. Этот материал хорошо сваривается и склеивается, при температуре + 80 °С оргстекло начинает размягчаться, при температуре + 150…180 °С появляется пластичность, что позволяет формировать из него различные детали.

Недостатком оргстекла является склонность к образованию микротрещин, так называемого “серебра”, что снижает прозрачность стекла. Причиной возникновения трещин являются внутренние напряжения, возникающие в связи с низкой теплопроводностью при высоком температурном коэффициенте линейного расширения. В этом случае хаотично расположенные макромолекулы при нагревании будут расширяться в разных направлениях, что и вызовет появление внутренних напряжений.

Оргстекло хорошо обрабатывается механически, сваривается. Из него изготавливают светотехнические детали, оптические, в том числе, контактные линзы (полиметилметакрилат СТ – 1, ЛСО – 14), призмы, солнцезащитные очки, пластины для замещения дефектов черепа и т.д. Известен органический триплекс – склеенные с помощью специальной клеящей плёнки листы.

Поликарбонат - сложный полиэфир угольной кислоты; выпускается под названием дифлон. Это кристаллический полимер, которому при плавлении и последующем охлаждении можно придать аморфную структуру. Такой материал становится стеклообразным и прозрачным. Свойства поликарбонатов своеобразны - им присущи гибкость и одновременно прочность и жесткость. По прочности при разрыве металл близок к винипласту и отличается высокой ударной вязкостью, он не хладотекуч. При длительном нагреве, вплоть до температуры размягчения, образцы сохраняют свои размеры и остаются эластичными при низких температурах.

Поликарбонат химически стоек к растворам солей, разбавленным кислотам и щелочам, маслам; разрушается крепкими щелочами; выдерживает светотепловакуумное старение и тепловые удары, тропикостоек. Поликарбонат имеет ограниченную стойкость к воздействию ионизирующего излучения. Поликарбонаты растворяются в хлорированнных углеводородах, крезоле и других растворителях. Температура их плавления колеблется от 150 до 270 °С, они морозостойки до - 100 °С.

Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, автодетали, радиодетали и т.д. Его используют в криогенной технике для ра-

боты в среде жидких газов. Дифлон применяют также в виде гибких, прочных пленок.

Общим свойством термопластов является обратимость. Это свойство позволяет использовать вторичное сырье для производства изделий.

4.1.4. Реактопласты

Пластмассы с порошковыми наполнителями. Термореактивные пресскомпозиции готовят на основе фенолформальдегидных, амино-формальдегидных, анилино-формальдегидных и полисилоксановых. В количестве наполнителей применяют органические (древесная мука) и минеральные (молотый кварц, асбест, слюда, графит и др.) порошки.

Свойства порошковых пластмасс характеризуются изотропностью, высокой механической прочностью и низкой ударной вязкостью, удовлетворительными электроизоляционными показателями. Их применяют для несиловых конструкционных и электроизоляционных деталей. Минеральные наполнители придают пластмассе водостойкость, химическую стойкость, повышенные электроизоляционные свойства, устойчивость к тропическому климату.

В приборостроении широко используются слоистые пластики: текстолит, стеклотекстолит и гетинакс.

Текстолит (*связующее* – термореактивные смолы, наполнитель – хлопчатобумажные ткани) среди слоистых пластиков обладает наибольшей способностью поглощать вибрационные нагрузки, хорошо сопротивляется раскалыванию. В зависимости от назначения текстолиты делят на конструкционные (ПТК, ПТ, ПТМ), электротехнические, гибкие прокладочные. Текстолит, как конструкционный, материал применяют для зубчатых колес. Такие зубчатые передачи работают бесшумно при частоте вращения до 30000 мин $^{-1}$. Текстолитовые вкладыши подшипников служат в 10 – 15 раз дольше бронзовых. Однако рабочая температура текстолитовых подшипников невысока (80 –90 °С). Они применяются в насосах, турбинах и др.

Стеклотекстолит. В качестве наполнителя применяют стеклянные ткани. Стеклотекстолит на фенолоформальдегидном связующем недостаточно вибропрочен, но по сравнению с обычным текстолитом он более теплостоек и имеет более высокие электроизоляционные свойства. Эпоксидные связующие (ЭД-8, ЭД – 10) обеспечивают стеклотекстолитам наиболее высокие механические свойства. Температура эксплуатации до 250 °С.

Гетинакс получается на основе модифицированных фенольных,

анилиноформальдегидных и карбамидных смол и различных сортов бумаги. По назначению гетинакс подразделяют на электротехнический и декоративный. Гетинакс можно применять при температуре 120…140 °С. Он устойчив к действию химикатов, растворителей, пищевых продуктов: используется для внутренней облицовки пассажирских кабин самолетов, железнодорожных вагонов, кают судов и др.

Гетинакс и стеклотекстолит является основным материалом для изготовления печатных плат электронных узлов приборов. Стеклотекстолит обеспечивает высокое качество для условий эксплуатации с повышенными требованиями. Но стеклотекстолит обладает сильными абразивными свойствами, что приводит к интенсивному износу режущего инструмента при механической обработке.

4.1.5. Газонаполненные пластмассы

Газонаполненные пластмассы представляют собой гетерогенные дисперсные системы, состоящие из твердой и газообразной фаз. Структура таких пластмасс образована твердым, реже эластичным полимером – связующим, которое образует стенки элементарных ячеек или пор с распределенной в них газовой фазой – наполнителем. Такая структура обусловливает чрезвычайно малую массу и высокие звукотеплоизоляционные характеристики. В зависимости от физической структуры газонаполненные пластмассы делят на пенопласты, поропласты и сотопласты.

Полимерные связующие могут быть как термореактивными, так и термопластичными. Для термопластичных полимеров наиболее опасны температуры, близкие к температуре текучести, когда значительно снижается прочность материала и избыточное давление газа внутри ячеек может разрушить пенопласт. Для получения эластичных материалов вводят пластификаторы.

Пенопласты – материалы с ячеистой структурой, в которой поры изолированы друг от друга и окружающей среды тонкими перегородками полимеров – связующего (рис. 4.3, а).

Поропласты (губчатые материалы) имеют открытую пористую структуру, вследствие чего поры могут сообщаться друг с другом и с окружающей атмосферой (рис. 4.3, б).

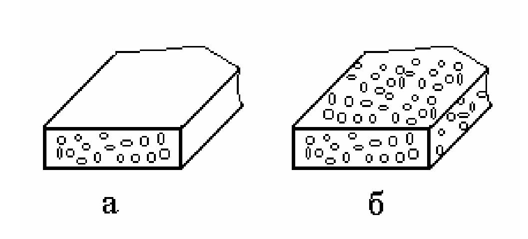


Рис. 4. 3.   Газонаполненные пластмассы

Наибольшее распространение получили пенопласты (плотность 0,02…0,2 т/м^3). Пенопласты хорошо обрабатываются на деревообрабатывающих станках, легко склеиваются. Все более широкое распространение получает нанесение вспениваемой пластмассы методом напыления.

Вспененные материалы часто используют как составляющую комбинированной конструкции, называемой сандвич-конструкцией (рис. 4.4). Здесь для наружных слоев применяют самые различные материалы [11].

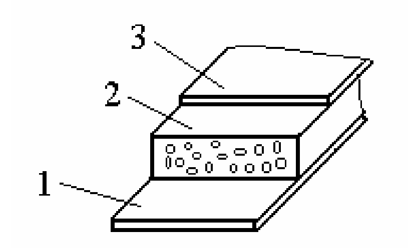


Рис. 4.4. Комбинированная конструкция с применением вспененного материала: 1, 3 – наружные слои; 2 – слой вспененного материала

4.1.6. Резиновые материалы

Резиной называется продукт специальной обработки (вулканизации) смеси каучука и серы с различными добавками.

Резина отличается высокими эластическими свойствами. Она способна к большим деформациям (относительное удлинение достигает 1000 %), которые практически полностью обратимы.

Кроме отмеченных особенностей для резиновых материалов характерны высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, электроизолирующие свойства и небольшая плотность. По назначению, в зависимости от условий эксплуатации, резины разделяют на резины общего и специального назначения [3,5,8, 9]. Назначение резин, относящихся к тому или иному виду, отражено в их названии.

Контрольные вопросы

1. Перечислите достоинства и недостатки пластмасс по сравнению с металлами и сплавами.
2. Какие классы полимерных материалов Вам известны?
3. Чем отличаются свойства линейных и пространственных полимеров?
4. Классификация полимерных материалов по реакции на воздействие температуры.
5. Назовите основные преимущества термореактивных пластмасс. Каков

механизм их отверждения?
6. Назовите вещества, входящие в состав пластмасс. Каково назначение этих веществ?
7. Каков механизм отверждения термопластичных пластмасс? перечислите достоинства и недостатки термопластов. Приведите примеры термопластов и назовите области их применения.
8. Какова структура пенопластов и поропластов? Области применения.
9. Структура и свойства резины, область её применения.

4.2. Неорганические неметаллические материалы

4.2.1. Алмаз и графит, несиликатные материалы

Алмаз является кристаллической модификацией углерода с гранецентрированной кубической решеткой, каждый атом углерода в которой связан прочными ковалентными связями с тремя соседними, расположенными в вершинах тетраэдра. Прочность ковалентой связи, малые расстояния между атомами (0,154 нм) обусловливают максимальную для минералов твердость алмаза (10 единиц по шкале Мооса) и его высокую химическую стойкость. При нагреве до 1800 °С без доступа кислорода алмаз превращается в графит, в присутствии кислорода сгорает при 870°С. Алмаз имеет очень высокую теплопроводность (в 5 раз выше теплопроводности меди), но является диэлектриком. В природе алмазы встречаются в виде монокристаллов, а искусственные (синтетические) алмазы получают в виде мелких кристаллов в основном из графита при температуре 1300...1600 °С и давлении 4,5…8 ГПа. Из алмаза делают резцы, инденторы для измерения твердости, а также абразивные порошки.

Графит представляет интерес и как самостоятельный материал, используемый в технике. Графит, являясь полиморфной модификацией углерода с гексагональной кристаллической решеткой, обладает сочетанием свойств, обусловивших его применение в качестве конструкционного (плавильные тигли, электроды, детали ракет и ядерных реакторов) и антифрикционного (твердые смазки, подшипники и электрощетки) материала.

Графит сочетает высокую жаропрочность и кислотостойкость, электропроводность и теплопроводность. Прочность и модуль упругости графита растут с повышением температуры. Графит не плавится, а возгорается при 3800 °С. Из синтетических волокон графита и тканей специальной термической обработкой получают углеродные волокна и ткани, находящие широкое применение в качестве упрочняющих ком-

понентов композиционных материалов.

Дисульфид молибдена (MoS_2) характеризуется очень низким коэффициентом трения (0,017…0,047), особенно в вакууме, где его термическая стабильность составляет 1100 °С. В связи с этим он является важнейшим компонентом твердосмазочных материалов и покрытий, используемых в ответственных узлах трения механизмов в таких областях, как авиация и космическая техника. Получают его из природного молибдена или синтетическим путем. Для массового применения используют порошок МВЧП (98,5 % MoS_2) с частицами размером 1…7 мкм.

4.2.2. Минеральные материалы на основе силикатов

Материалы минерального происхождения используют как компоненты керамики, стекол, композиционных материалов. Кроме того, они используются и как самостоятельный материал.

Асбест – собирательное название материалов на основе природных гидросиликатов. При механическом воздействии асбест способен расщепляться на гибкие, тонкие (до 0,5 мкм) волокна длиной до 18 мм. Предел его прочности достигает 2…4,5 ГПа. Важнейший из видов асбеста – хризолит $Mg_3\,[Si_2O_5]\,(OH)_4$ характеризуется температурой плавления 1550 °С, огнестоек, устойчив к действию щелочей. Асбест используется для изготовления огнестойких материалов, фильтров, материалов для тормозных накладок и др.

Кварц – кристаллическая форма диоксида кремния – один из самых распространенных в земной коре, прочных и стойких материалов. Предел прочности при сжатии достигает 2000 МПа, при растяжении – 100 МПа, температура плавления 1470 °С, плотность 2650 кг/ $м^3$, твердость по шкале Мооса – 7 единиц. Кварц химически стоек, оптически анизотропен, обладает пъезоэлектрическими свойствами. Встречается в природе, как в основном состоянии, так и в форме прозрачных и окрашенных разновидностей (аметист, дымчатый топаз, горный хрусталь и т.п.). В виде монокристаллов кварц применяют в электро- и радиотехнике в качестве элементов аппаратуры (пъезопреобразователей, фильтров, генераторов), дисперсный – в качестве абразивных материалов и др.

Слюда - общее название природных алюмосиликатов слоистой структуры с общей формулой $R_1R_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$, где R_1 – K, Na, R_2 – Al, Mg, Fe, Li. Кристаллы слюды расщепляются на тонкие, упругие и прочные листочки. Температура плавлению слюды – 1200…1300 °С, плотность 2200…3300 кг/$м^3$, твердость по шкале Мооса – 2,5…3 едини-

цы. Этот материал отличается химической стойкостью, хорошими диэлектрическими свойствами [5]. Молотую слюду используют в качестве компонента пластических масс и резин.

4.2.3. Неорганическое стекло

Неорганическое стекло – твердый некристаллический материал, получаемый переохлаждением расплава стеклообразующих компонентов (оксидов кремния, бора, алюминия, фосфора, титана, циркония и др.) и модифицирующих оксидов металлов: лития, калия натрия, кальция, магния, свинца и др.

Процесс перехода системы из жидкого состояния в стеклообразное является обратимым. Ее стеклообразное состояние менее устойчиво, чем кристаллическое, характеризующееся избыточной внутренней энергией системы, что делает возможным ее самопроизвольный переход лишь из стеклообразного в кристаллическое состояние. В структуре неорганического стекла обнаруживается микрокристаллические образования – кристаллиты, которые внутри имеют кристаллическую решетку, а на периферии их структура менее упорядочена. Прослойки между кристаллитами находятся в стеклообразном состоянии.

Наиболее широко применяется силикатное стекло, основной компонент которого – диоксид (SiO_2). Чистый диоксид кремния в стеклообразном состоянии (кварцевое стекло) имеет каркас из тетраэдров [SiO_4]$^{-4}$, соединенных вершинами. От решетки кристаллического кварца этот каркас отличается тем, что узлы между связями меняются в широких пределах, и поэтому их упорядоченность нарушается (рис. 4.5).

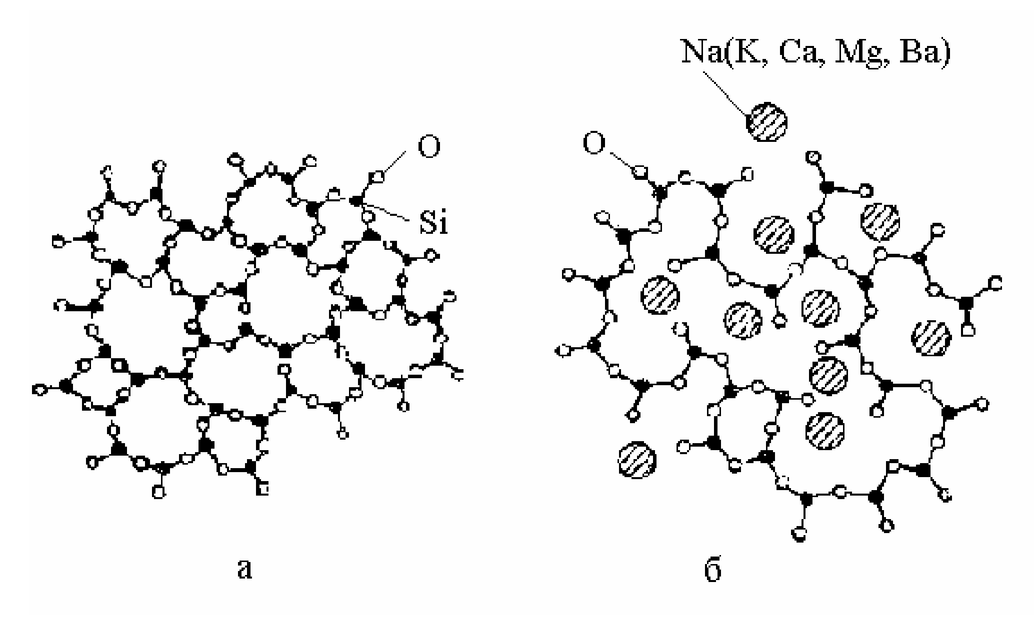


Рис. 4.5. Структура неорганических стекол: а – кварцевых; б - силикатных

Техническое стекло имеет в основном алюмоборосиликатную стеклообразующую основу (Al_2O_3 – B_2O_3 – SiO_2), модифицированную оксидами металлов, которые облегчают технологию производства стекла и изменяют его физико-механические характеристики.

4.2.4. Техническая керамика

Керамические материалы получают высокотемпературным отжигом минеральных порошков. Техническую керамику получают на основе оксидов тугоплавких металлов IV и VI групп периодической системы элементов. Получают из нитридов кремния, бора, алюминия, силицидов, боридов, переходных металлов, галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов.

По структуре керамические материалы представляют собой многофазные системы, в которые входят кристаллические и стекловидная фазы, а также газовые включения. Объёмная доля стекловидной фазы в керамике может доходить до 40 % и по составу обычно отличается от кристаллической. Газовая фаза распределена в порах керамики, её присутствие снижает прочность материала. Керамика с газовыми может пропускать жидкость (в качестве фильтров), применяется в качестве диэлектриков.

Плотную керамику микрокристаллической структуры (размер зерна 1…5 мкм) применяют как конструкционный материал для изготовления деталей машин, инструментов. Наиболее прочными характеристиками обладает керамика на основе чистых оксидов: Al_2O_3, BeO, ZrO_2, MgO, CaO и других металлов (табл. 4.1). Ее используют для изготовления резцов, фильер (отверстий, через которые протягивается проволока), сопел, калибров подшипников, печей, тиглей, подложек, микросхем.

Таблица 4.1

Основные свойства керамики на основе чистых оксидов

Оксид-основа	Температура плавления $t_{пл}$,°С	Плотность ρ, кг/м^3	Предел прочности $\sigma_в$, МПа, при растяжении	сжатии	изгибе	E, ГПа
Al_2O_3	2050	3990	260	3000	150	382
ZrO_2	2700	5600	150	2100	230	172
BeO	2580	3020	100	800	130	310
MgO	2800	3580	100	1400	110	214
CaO	2570	3350	-	-	80	-

В производстве электротехнического и химического оборудова-

ния применяют *фарфор* - керамический материал с незначительной долей закрытых пор, получаемых на основе смеси: SiO_2 – 74,8 … 75,2 %, Al_2O_3 – 19,3 … 21,1 %, K_2O – 2,7 … 4,4 %. Он обладает очень высокими электроизоляционными свойствами, механической прочностью и стойкостью во всех кислотах, кроме плавиковой (раствор HF в воде).

Технология получения керамических материалов всех видов включает в себя следующие операции: измельчение исходных продуктов, их перемешивание, увлажнение с добавлением временных связывающих, формование изделий (прессованием, литьём, экструзией), низкотемпературный отжиг для удаления связующих и высокотемпературный отжиг для получения требуемого фазового состава.

Основной недостаток керамики – хрупкость. Подавить её можно путем повышения однородности и мелкозернистости структуры керамики (устранение пор, агломератов частиц и химических примесей). Для этого используют тонкий размол исходного порошка, повышение температуры отжига и т.п. Рисунок 4.6 иллюстрирует влияние размера микрокристаллов, формирующих керамику на основе карбида кремния, на ее прочность.

При специфических условиях подготовки сырья и спекания возможно получение керамики с кристаллитами размером 0,3 мкм, которые характеризуются относительным удлинением при растяжении до 100 %. Для обработки такой керамики применяют традиционные методы - экструзию, волочение, ковку.

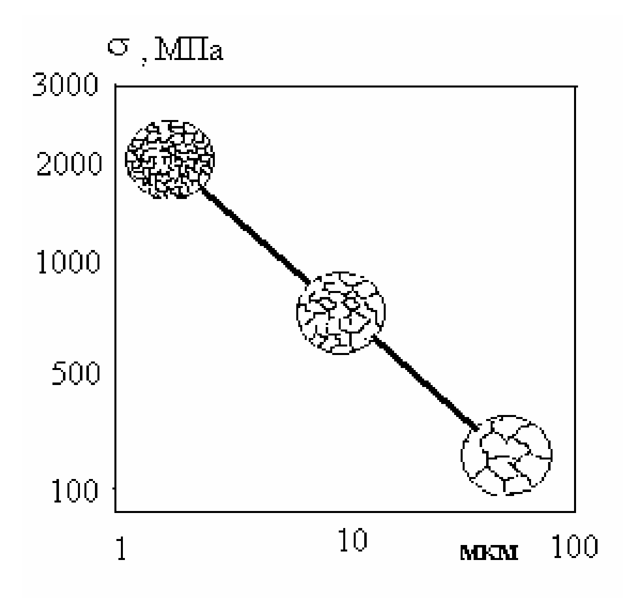


Рис. 4.6. Зависимость прочности керамики на основе карбида кремния от размера микрокристаллов

4.2.5. Материалы подложек интегральных тонкоплёночных микросхем

Подложка в пленочных интегральных микросхемах является электронно- пассивной (стекло, керамика). Требования к материалу подложки: незначительная стоимость; незначительная шероховатость поверхности; хорошая адгезионная способность; достаточная механическая прочность и устойчивость при воздействии температуры и влажности; высокая теплопроводность; соразмерность температурных коэффициентов линейного расширения материала подложки и осаждаемой пленки; высокое удельное сопротивление ρ; лёгкая формуемость (пластичность) и химическая стойкость.

Особенно важным фактором является шероховатость поверхности и теплопроводность. Так как свойства осажденных слоев в значительной степени определяются высотой неровностей подложки, то в зависимости от способа получения слоев они должны находиться в пределах от 0,01 – 1 мкм. Если эти условия не выполняются, то шероховатости на обкладках конденсаторов приводят к высокой напряженности поля и к пробою. Наилучшую чистоту поверхности имеет стекло огненной плавки (высота микронеровностей около 0,006 мкм (рис.4.7), но его теплопроводность составляет только 1/15 – 1/150 теплопроводности керамических подложек Al_2O_3, BeO.

В табл. 4.2 приведены важнейшие свойства материалов подложек интегральных микросхем (ИМ).



Рис. 4.7. Применение стеклянных подложек для тонкопленочных микросхем

Как видно из таблицы, керамика имеет на один, два порядка выше теплопроводность, чем стекло. Однако большая шероховатость поверхности керамики не позволят использовать ее для тонкопленочных ИМ. Но для толстопленочных ИМ керамика может быть с успехом применена. Для толстопленочных ИМ наиболее важным критерием является теплопроводность, т.к. токи, протекающие по проводникам в этих ИМ значительно больше, чем в тонкопленочных, а, следовательно, увеличивается выделение тепла, которое нужно отводить в окружающую среду. При сравнительном анализе свойств промышленных керамических материалов становится очевидным, что только оксид бериллия (BeO) удовлетворяет требованиям,

предъявляемым к материалам для систем высокой мощности. Изделия из BeO поставляются толщиной от 0,5 мм во всех формах и размерах согласно требованиям заказчика. В табл. 4.3 указаны данные о подложках из оксида бериллия.

Таблица 4.2

Свойства материалов подложек для тонкопленочных и толстопленочных ИМ

Материал подложек	Температура размягчения °С	Температура деформации °С	Температурный коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} K^{-1}	Теплопроводность λ, Вт/мК при 25°С	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при 25°С
Щелочное стекло	695	490	9,2	0,96	10^{11}
Боросиликатное стекло	820	520	0,8…6	0,84…1,3	
Алюмосиликатное стекло	872	613	4,5	1,2	
Кварцевое стекло	1670	1070	0,6	1,4	10^{16}
Керамика Al_2O_3	1600	-	6,7	10…35	10^{14}
Керамика BeO	1600	-	6,7	230	10^{12}

Таблица 4.3

Характеристики подложек из оксида бериллия

Цвет подложки	белый
Твердость по Моосу	9
Содержание BeO, %	99,5
Размер зерна, мкм	14… 30
Стойкость к термоудару, циклов	150
Электрическая прочность, кВ/мм	25
Шероховатость, Ra, мкм: номинальная поверхность полированная поверхность	 4…6 2…1
Допуск, мкм при толщине 0,5мм При толщине > 1 мм	±0,01 ±0,05…0,1

4.2.6. Ситаллы (стеклокристаллические материалы)

Ситаллы получают на основе неорганических стекол путем их полной или частичной управляемой кристаллизации. Термин “ситаллы” образован от слов: стекло и кристаллы. За рубежом из называют стеклокерамикой и пирокерамами. По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между стеклом и керамикой. От неорганических стекол они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов – более мелкозернистой и однородной микрокристаллической структурой (рис. 4.8)

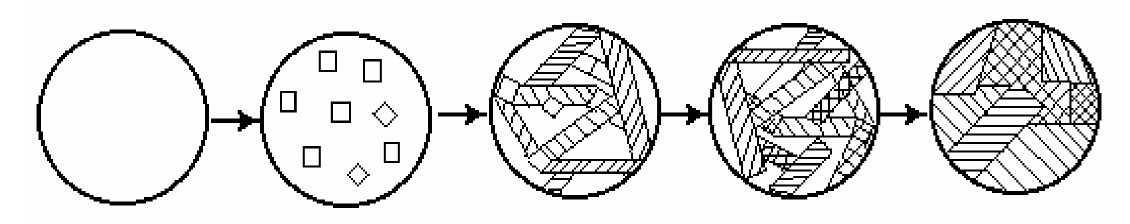


Рис. 4.8. Схема кристаллизации стекла при образовании ситаллов с помощью кристаллизаторов

Ситаллы получают путем плавления стекольной шихты специального состава с добавкой нуклеаторов (катализаторов), охлаждения расплава до пластического состояния и формования из него изделий методами стекольной технологии и последующей ситаллизации (кристаллизации). Ситалловые изделия получают также методом спекания порошков.

В состав стекла, применяемого для получения ситаллов, входят оксиды Li_2O, Al_2O_3, SiO_2, CaO и катализаторы кристаллизации в виде солей светочувствительных металлов Au, Ag, Cu.

Плотность ситаллов лежит в пределах 2400…2950 кг/м^2, прочность при изгибе $\sigma_{изг}$=70…350 МПа, при сжатии $\sigma_{изг}$=700…2000 МПа, модуль Юнга E= 84…141 ГПа. Жаропрочность ситаллов под нагрузкой составляет 1250…1350 °С. Ситаллы относятся к хрупким материалам Они весьма износостойки ($f_{тр}$ = 0,07…0,19). По теплопроводности ситаллы превосходят стекла (λ = 2…7 Вт/ м·К). Коэффициент линейного расширения лежит в пределах $(7…300)\cdot10^{-7}$ °С$^{-1}$. Ситаллы обладают высокой химической стойкостью к кислотам и щелочам, не окисляются даже при высоких температурах. Они газонепроницаемы и обладают нулевым водопоглощением. Хорошие диэлектрики.

Применение ситаллов определяется их свойствами. Из них изготавливают подшипники, детали радиоэлектроники, сопла реактивных двигателей, точные калибры, фильеры для вытягивания синтетических

волокон и др.

4.3.Технические жидкости и газы

13.1. Смазочно-охлаждающие и технологические жидкости

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) совмещают свойства смазочных масел и технологических жидкостей. Они одновременно смазывают поверхность инструмента и обрабатываемой детали, улучшая качество обрабатываемой поверхности, отводят тепло, смывают стружку, пыль и другие загрязнения, а также защищают поверхности инструмента и детали от коррозии. Вследствие многофункционального назначения СОЖ для их приготовления используют широкую номенклатуру масел, синтетических жидкостей, водных растворов, присадок и добавок.

К *технологическим жидкостям* относят разделительные составы, предназначенные для снижения адгезии в контакте пресс-форм и литьевых форм с изделиями из резины и пластических масс. Основой таких составов являются кремнийорганические жидкости или их водные эмульсии. Разделительные составы должны обладать высокой теплостойкостью, инертностью к металлам, низкой летучестью, нетоксичностью и невзрывоопасностью.

Важный вид технологических жидкостей – *закалочные среды*, приготовляемые на основе масел, водных растворов солей, водорастворимых полимеров.

Моющие жидкости - применяют для промывки деталей и узлов в процессе их производства и ремонта. К таким жидкостям относят водные растворы на основе кальцинированной или каустической соды, солей калия и натрия, а также органические растворители (ацетон, бензин, спирт, спиртобензольные смеси и т.д.) и смеси на основе мыл и стиральных порошков.

Смазочные масла. Смазочными маслами называют вещества, обладающие смазочным действием, т.е. способностью снижать трение, уменьшать скорость изнашивания и устранять заедание трущихся поверхностей. Большинство смазочных материалов, за исключением твердых смазок (графит, дисульфид молибдена), являются жидкими. При этом они, как правило, имеют многокомпонентный состав, в том числе и с включением твердых добавок. Почти все смазки созданы на основе масел различного происхождения.

Главными видами смазочных масел являются минеральные (нефтяные) и синтетические. Некоторые марки смазочных масел: И – 5А, И – 20А, И – 100А (индустриальные), Т22– турбинные.

Пластические смазки – получают введением в жидкие масла твёрдого загустителя, присадки и наполнители. Типичным представителями пластических смазок являются: солидол С; ЦИАТИМ – 221; ЦИАТИМ – 201; ЦИАТИМ – 205; ОКБ – 122 – 7; графитол.

4.3.2. Специальные технические жидкости и газы

Специальные жидкости характеризуются несжимаемостью или сжимаемостью, летучестью или неиспаряемостью, защитными свойствами или стабильностью характеристик и т.д. К ним относятся амортизационные жидкости, гидравлические масла, демпфирующие жидкости, вакуумные масла и другие жидкости, приготовляемые в основном на базе минеральных масел и кремний органических жидкостей.

Газы и их смеси имеют широкое применение в качестве топлив при газоплазменной резке, плазмообразующих сред в процессах ионно-плазменной обработки, сварочных газов, хладоагрегатов в холодильных установках и др.

Азот применяют для создания нейтральной атмосферы при термообработке металлов.

Аммиак используют в качестве хладоагрегата в холодильных установках и др.

А*ргон* применяют для создания нейтральной атмосферы внутри герметичных газонаполненных приборов, при сварке и пайке металлов, а также для образования плазмы при ионно-плазменной обработке; ацетилен при сварке и резке металлов.

Водород используют при автогенной резке и химико-термической обработке сталей.

Кислород применяют для автогенной резки и сварки, при интенсификации термических и металлургических процессов.

Криптон и ксенон - в электровакуумной технике для наполнения различных приборов; *метан и пропан* - при химико-термической обработке и в качестве топлива при пламенной закалке.

Контрольные вопросы

1. Что общего и в чем различие между алмазом и графитом? Назовите области применения алмаза и графита.
2. Какими свойствами обладает дисульфид молибдена? Назовите область применения MoS_2
3. Приведите структуру и область применения асбеста, кварца и слюды.
4. Какие виды стекол нашли наиболее широкое применение в элек-

тронной технике и для каких целей?
5. В чем сходство и различие между ситаллом и стеклом?
6. Назовите известные Вам технологические жидкости. Дайте характеристику этих жидкостей.
7. Какие газы применяют в технике и технологиях и для каких целей?

Глава V. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. Общие сведения и историческая справка

К композиционным материалам могут быть отнесены многие природные материалы. Оптимальное сочетание и расположение твердых и мягких, жестких и эластичных составляющих характерно для строения древесины, костей человека и животных. Например, в костях имеются тонкие и прочные нити фосфатных солей, связанных пластичным материалом - коллагеном. В стволах деревьев волокна целлюлозы связаны пластичным веществом - лигнином. Композиционную структуру имеют гранит, многие разновидности кремнезема.

Человек начал применять принцип армирования в глубокой древности. В Шумериии и Вавилоне около 6 тыс. лет назад в глиняные строительные кирпичи и гончарные изделия для уменьшения их усадки и растрескивания при обжиге добавляли измельченные камни, солому, ветки. В середине XV в. при постройке храма Василия Блаженного в Москве русские зодчие Барма и Постник применили армированные железными полосами каменные плиты.

Прообразом современных композиционнных материалов считается железобетон. Первый патент на изготовление цветочных кадок из материала, сочетавшего металлическую проволоку и цемент, был получен в 1867 г. парижским садовником Ж. Монье. Армированные стеклянными волокнами полиэфирные материалы впервые применены в конструкции самолета в 1942 г., а несколько позже было начато и промышленное производство стеклопластиков. Современные высокопрочные композиты на полимерной и металлической матрицах, армированные высокомодульными волокнами и “усами”, начали широко использовать в начале 70 – х годов прошлого века.

54. 2. Основные определения и классификация

Композиционные материалы – это конструкционные материалы сложного состава, получаемые путём объёмного сочетания разнородных компонентов (фаз) с границей раздела между ними (рис. 5.1).

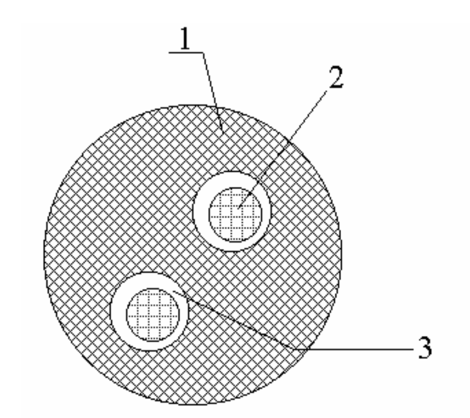


Рис. 5.1. Композиционный материал: 1 – матрица, 2 – армирующие элементы, 3 – зона раздела фаз

Компонент, непрерывный в объёме композиционного материала, называют матрицей. Матрица связывает композицию и придаёт ей форму. Другие компоненты (арматура, наполнители) распределены в матрице. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические материалы. Армирующие элементы (наполнители) вводят в композиционный материал не только с целью увеличения прочности, но также для увеличения жесткости и пластичности; изменения плотности, электрических, теплофизических и других характеристик в различных направлениях и отдельных местах изделия. На границе матрицы и арматуры располагаются тонкие слои – зоны раздела фаз.

Классификация композиционных материалов по типу матрицы:

- полимерные (термопласты, реактопласты, смеси),
- металлические (в том числе методом порошковой металлургии),
- неорганические (полимеры, минералы, керамика, углерод),
- комбинированные (полиматричные).

Наполнители – дисперсные и коротковолнистые вещества, введение которых позволяет достичь не более чем 1,5 – 2 кратного повышения прочности матрицы. *Арматура* – высокопрочные волокна, усы, ткани, которые повышают прочность материала в 2 – 10 и более раз по сравнению с прочностью матрицы. В композиционном материале могут находиться и наполнители, и армирующие элементы. Композиты могут содержать армирующие и наполняющие компоненты различных размерностей. В матрице армирующие элементы могут быть расположены хаотически, но чаще их стараются разместить в определенном порядке (рис. 5.2).

Композиционные материалы, имеющие одинаковые свойства во всех направлениях, называют *изотропными*. К ним относят хаотически наполненные порошками, короткими волокнами и чешуйками композиты. Материалы, свойства которых неодинаковы по различным направлениям, называют *анизотропными*. Это композиты с армирующими элементами в виде непрерывных волокон, пластин, тканей, сеток.

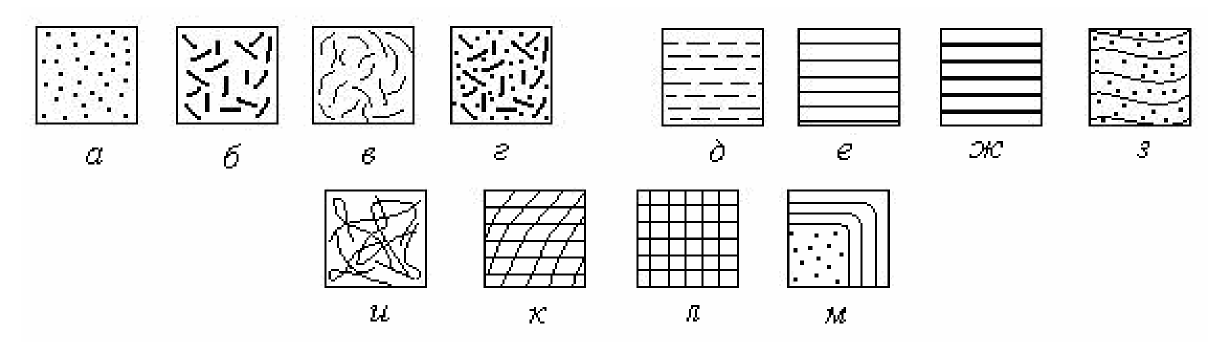


Рис. 5.2. Простейшие случаи хаотичного (а-г, и), одноосного (д-з) и сложноориентированного расположения наполнителей и армирующих элементов в матрице композиционного материала: а – порошка; б – коротких волокон; в – чешуек; г – смеси порошка с короткими волокнами; д – коротких волокон; е – длинных волокон; ж – тканей и фольг; и длинных скрученных волокон

При выборе схемы прочностного расчета высокопрочные композиционные материалы делят на три группы: с одноосным, двухосным (плоскостным) и трехосным (объемным) армированием (рис. 5.3).

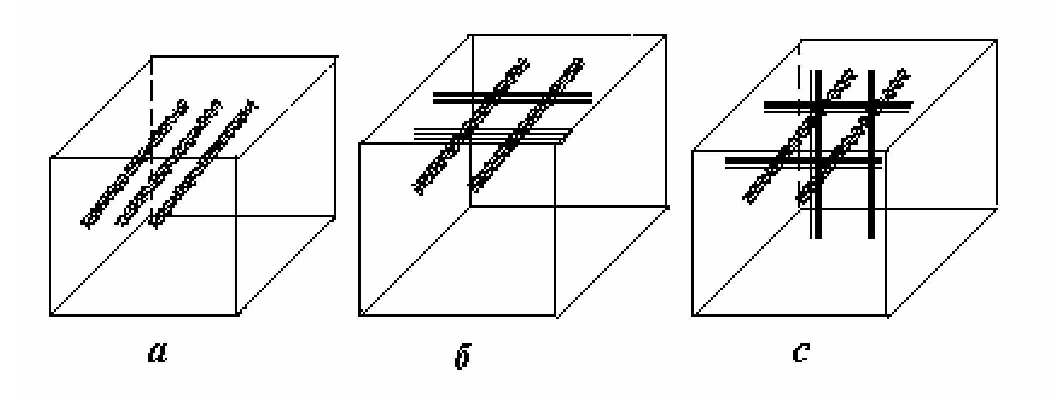


Рис. 5.3. Схемы армирования композиционных материалов волокнистыми (одномерными) элементами:
а – одноосное; б – двухосное; в – трехосное

На рис. 5.4 показана зависимость прочности материала от расположения армирующих волокон [2].

По типу материала матрицы различают: металлические композиты (медь, алюминий, сталь, вольфрам, титан, а также получаемые методом порошковой металлургии); неорганические (керамика и минералы – техническая керамика, стекло, углерод); полимерные (полиамиды, эпоксидные компаунды, фторопласт и др.); комбинированные (полиматричные).

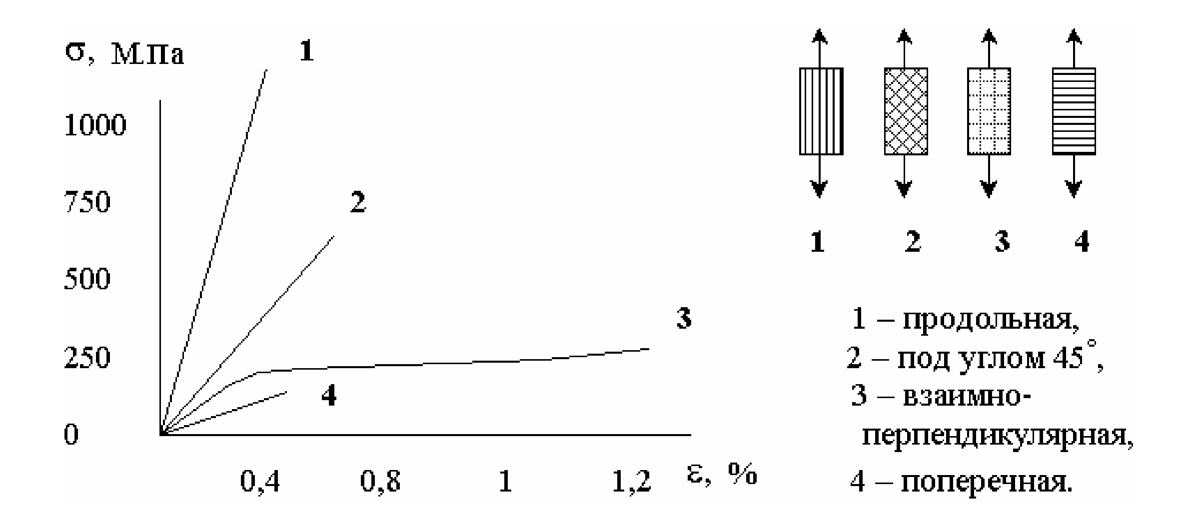


Рис. 5.4. Зависимость предела прочности эпоксидного углепластика от вида арматуры (от расположения армирующих волокон)

5.3. Композиционные материалы на полимерной матрице

Матрицами композиционных материалов на полимерной основе могут быть любые материалы на основе органических полимеров (поливинилхлорид, полистирол, полиэтилен, фенолформальдегидные смолы, эпоксидные, полиэфирные, кремнийорганические смолы). В качестве наполнителей и армирующих элементов используют материалы в любой фазе, относящиеся к любому типу рассмотренных ранее материалов. В качестве примера рассмотрим механические характеристики некоторых волокнистых композиционных полимерных материалов:

бороволокниты: КМБ – 3к ⇒ ρ=2 т/м^3, $\sigma_в$=1300 МПа (при растяжении), что примерно соответствует широко применяемой в настоящее время стали 30 ХГСА, Е=260 ГПа (при растяжении) превосходит стали, ε = 0,3 - 0,4 % (при растяжении);

карбоволокниты (углепласты) – представляют собой композиции, состоящие из полимерной матрицы и упрочнителей в виде углеродистых волокон. КМУ – 1у ⇒ ρ=1,47 т/м^3, $\sigma_в$=1020 МПа (при растяжении), Е=180ГПа (при растяжении), ε=0,6 % (относительное удлинение при разрыве). Обладают высокими динамическим и статическим сопротивлениями усталости. При этом обеспечивается хорошая износостойкость

5.4. Эвтектические композиционные материалы

Эвтектическими композиционными материалами (КММ) называют сплавы эвтектического или близкого к нему по составу, в которых

армирующей фазой служат ориентированные волокнистые или пластинчатые кристаллы, образовавшиеся в процессе направленной кристаллизации.

Структура таких материалов формируется естественным путем, а не в результате искусственного введения армирующих компонентов в матрицу. Проблемы химической несовместимости между матрицей и упрочняющей фазой не существует вследствие равенства химических потенциалов компонентов и равновесных условий кристаллизации таких систем.

Технология формирования эвтектических КММ включает операции, сущность которых заключается в создании плоского фронта кристаллизации, т.е. плоской поверхности раздела между расплавом компонентов КММ и кристаллизующимся телом. Для формирования изделия используют два метода:

1. *Метод Бриджмена.*

Метод Бриджмена состоит в том, что расплав вытягивается из зоны нагрева с постоянной скоростью. Форма фронта кристаллизации зависит от скорости вытяжки и от условий теплообмена, регулируемых подбором кристаллизатора, системой экранов и т.д.

2. *Метод зонной плавки.*

Метод зонной плавки заключается в расплавлении участка прутка с помощью электроннолучевого (или индукционного) нагрева и перемещении расплавленной зоны по длине прутка (рис. 5.5). Для выравнивания температуры и состава расплава части прутка, разделенные зоной расплавленного металла, вращают.

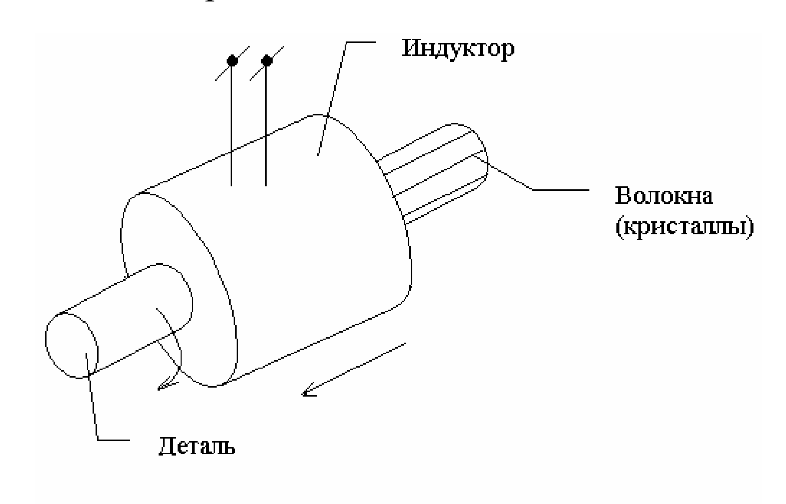


Рис. 5.5. Схема формирования пластинчатых кристаллов методом зонной плавки

Достоинством эвтектических КММ является технологичность их

изготовления – изделие формируется за одну операцию. Недостаток – малое содержание армирующей фазы (объёмная доля волокон – 35 %), низкая скорость растяжения кристаллов.

Номенклатуру эвтектических композиционных материалов делят на две части. Первую составляют материалы конструкционного назначения – на основе легких сплавов, жаропрочные, на основе тугоплавких металлов. Вторую группу составляют материалы с особыми физическими свойствами - полупроводниковые, ферромагнитные и др.

Типичными представителями материалов второй группы являются сплавы, имеющие структуру полупроводниковой матрицы из антимонида индия InSb (табл. 5.1), армированной волокнами проводников (Sb, NiSb, FeSb, MnSb, CuSb).

Таблица 5.1

Электрические свойства эвтектических КММ

Сплав	ρ, Ом·м
Sb	$4{,}4\cdot10^{-7}$
InSb	$1\cdot10^{-4}$
InSb – Sb	$3{,}05\cdot10^{-6}$

Электропроводность таких сплавов вдоль волокон сурьмы [10] на порядок выше, чем по нормали к ним. При ориентации волокон параллельно вектору электрической напряженности электромагнитного поля (рис. 5.6) происходит поглощение энергии последнего, при ориентации волокон по нормали - энергия электромагнитного поля не поглощается.

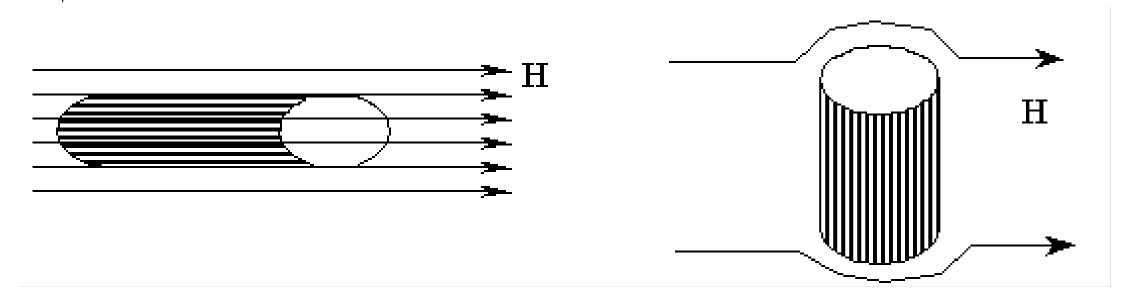


Рис. 5.6. Схема взаимодействия эвтектических КММ с электромагнитным полем

Такие сплавы применяют в электронной технике для изготовления бесконтактных переменных сопротивлений и переключателей электрических цепей, для измерения и регулирования постоянных токов, в детекторах излучения и др.

Эвтектические КММ, в которых одна или обе фазы ферромагнитны, обладают высокими показателями магнитных свойств (табл. 5.2). Магнитотвердыми материалами являются сплавы, матрица которых армирована ориентированными ферромагнитными волокнами с диаметром, близким к размеру доменов (около 1 мкм). Сплавы с обеими ферромагнитными фазами характеризуются большой остаточной индукцией и высокой коэрцитивной силой. КММ, состоящий из магнитомягкой матрицы и неферромагнитного упрочнителя, относят к магнитомягким материалам. Магнитные КММ применяют в технике для изготовления магнитопроводов, носителей информации (магнитные диски) и т.п.

Таблица 5.2

Магнитные свойства эвтектических сплавов

Материал	Тип фаз магнит.	H_c, А/м
Магнитотвёрдые		
Sm_2CO_{17}	ФМ – ФМ	3920
Fe Sb – Fe	ФМ – ФМ	41432
Bi – MnBi	ДМ – ФМ	320000
AuCo – Co	ПМ – ФМ	3600

Магнитомягкие	H_c, А/м	B, Тл
Fe – NiC 90% - 10%	120	1,98
Co – NbC 90% - 10%	3200	1,58
(Fe - Co) – NbC 41%+50%+9%	656	2,22

Контрольные вопросы

1. Какие природные материалы могут быть отнесены к композиционным?
2. Состав композиционных материалов.
3. Какой компонент композиционного материала называется матрицей?
4. Приведите классификацию композиционных материалов по виду матрицы.
5. Какую функцию выполняют в композиционном материале наполнители и арматура?
6. Примеры композиционных материалов на полимерной матрице.
7. Как зависит предел прочности эпоксидного углепластика от расположения в матрице армирующих волокон?
8. Каким способом формируется структура эвтектических композиционных материалов?

Глава VI. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ И МЕДИЦИНЫ

Особое место среди приборов занимают биотехнические и медицинские аппараты и системы. В процессе создания таких приборов и систем важнейшую роль играют материалы. Так, для искусственных сосудов, клапанов сердца, суставных и других протезов допустимы только материалы, обладающие совместимостью с живой тканью организма [3].

6.1. Материалы для хирургического инструмента

Для изготовления скальпелей, микроигл используют стали, обладающие требуемой твердостью, стойкостью к коррозии, износостойкостью. В этом ряду стоят следующие марки коррозионно-стойких сталей: аустенитная сталь Х13 (аналог в Англии AJSJ300), 3Х13, 4Х13, 30Х13 (AJSJ420), 40Х13, 08Х18Т1 (у стали 08Х18Т1 лучше штампуемость), 12Х18Н9Т.

Для изготовления микроигл используют также аустенитную сталь 12Х18Н10Т, высокопрочную пружинную проволоку 40КНХМВТЮ.

Для изготовления скальпелей применяют стали У12А, 100Х13М, сталь мартенситного класса 50Х14МФ (твердость поставки 18…22, закалка с охлаждением в масле индустриальном 20 до HRC 53…58).

Для микроинструмента и имплантатов применяют титановые сплавы ВТ1-0, ВТ6, ВТ14, обладающие высокой коррозионной стойкостью и биологической совместимостью.

6.2. Материалы для искусственных сосудов и других имплантатов

В этой группе материалов большое место занимают полимерные материалы и композиционные материалы на полимерной основе (табл. 6.1)

Таблица 6.1

Материалы имплантатов на полимерной основе [12].

Наименование материала	Обозначение документа	Марка материала	Назначение материала
Полиметилметакрилат	ТУ 6-01-544-75	Дакрил 2М0	Пластины для замещения дефектов черепа
Полиметилметакрилат	ТУ15809-70	СТ-1 ЛСО-М	Контактные линзы. Литнзы для корригирующих и солнцезащитных очков

Продолжение табл. 6.1

Сополимер N – винилпирролидона и метилметакрилата	*ТУ 42-2-361-80*	ППМ-1	Штифты для остеосинтеза
Композиция на основе этилового эфира цианакриловой кислоты	ТУ 64-7-66-80		Клей медицинский МК-2 для бесшовного соединения тканей организма
Фторопласт 4	ГОСТ 10007-80		Детали кислородно-дыхательной аппаратуры. Детали протезов клапанов сердца. Фетр медицинский для внутреннего протезирования. Основа протезов кровеносных сосудов. Сетка безузелковая для внутреннего протезирования.
Нить лавсановая окрашенная зеленая	ТУ 6-06-32-60-72		Нити хирургические.
Нить полиэфирная комплексная	ТУ 6-06-487-75		Нити хирургические. Протезы кровеносных сосудов.
Нить фторлоновая	ОСТ 6-05-09-85		Протезы кровеносных сосудов.

6.3. Материалы для искусственных клапанов сердца и медицинских изделий сердечно-сосудистой хирургии

Специальное конструкторское бюро медицинской тематики Кирово-Чепецкого химкомбината имеет большой опыт производства искусственных клапанов сердца. Основные изделия медицинского назначения этого предприятия: искусственный клапан сердца ЛИКС-2 (рис.6.1), искусственный клапан сердца КАРБОНИКС-1, кольцо опорное митральное КОМП–01, фетр медицинский из фторопласта 4.



Рис. 6.1. Искусственный клапан сердца ЛИКС-2

Дисковый искусственный клапан сердца ЛИКС-2 получил широкое распространение при замене естественных клапанов сердца человека, благодаря малой массе, удовлетворительным гемодинамическим характеристикам и низкому профилю.

Клапаны ЛИКС-2 применяются в клиниках с 1983 года. На настоящее время потребителям отправлено более 20000 клапанов. В 1996 году искусственные клапаны сердца ЛИКС-2 получили Сертификат соответствия России.

Запирающий элемент клапана выполнен из изотропного пиролитического углерода медицинского назначения — углеситалла. Мелкозернистая структура углеситалла позволяет получать полированные поверхности высокого класса чистоты с хорошими тромборезистентными свойствами. Корпус с ограничителями хода диска выполнен из одного куска технически чистого титана специального медицинского назначения, обладающего высокой биологической инертностью и хорошими физико-механическими показателями. Высокий класс чистоты поверхностей с повышенными тромборезистентными свойствами достигается оригинальной методикой электрополирования, которая разработана в СКБ МТ. Анализ отдаленных (более 10 лет) результатов клинического применения клапанов ЛИКС-2 подтверждает высокую эффективность и надежность конструкции.

Искусственный клапан сердца КАРБОНИКС-1 (рис.6.2) является дальнейшим развитием конструкций двухстворчатых клапанов. В 1990 году после всесторонних исследований в лабораторных и клинических условиях клапаны КАРБОНИКС-1 получили разрешение на применение. Клапан экспортируется в 17 стран Европы, Африки, Азии и Америки под торговой маркой JYROS. Технические решения конструкции клапана защищены авторским свидетельством и патентами РФ, патентами США, Японии и Европейским патентом.

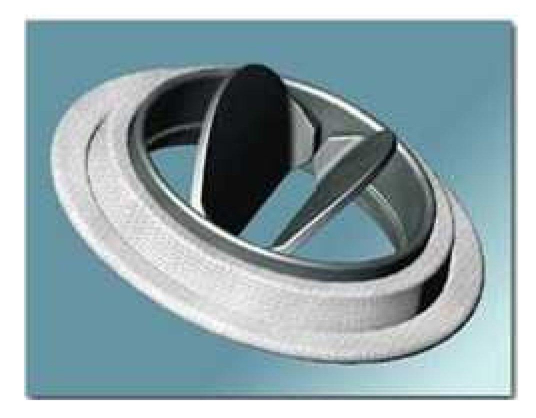


Рис. 6.2. Искусственный клапан сердца КАРБОНИКС-1

В 1996 году искусственные клапаны сердца КАРБОНИКС-1 получили Сертификат соответствия России.

Наибольший опыт (более 5 лет) применения клапанов КАРБОНИКС–1 (JYROS) – в Англии, где в шести центрах установлено более 400 протезов. Выживаемость составила 89 %, а для пациентов, выписанных из больниц – 96,6 %. 85 % пациентов улучшили свое состояние по классификации N.Y.H.A., по крайней мере, на один класс.

Использование колец опорных митральных КОМП–01 в медицинской практике позволяет устранить недостаточность митрального и трикуспидального клапанов сердца путем дилятации фиброзных колец клапанов и сохранить естественный клапан сердца пациента. Кольца опорные митральные КОМП–01 (рис. 6.3) состоят из рентгеноконтрастного кольца и вязаного покрытия. Рентгеноконтрастное кольцо выполнено из резиновой смеси на основе силиконового каучука. Наличие рентгеноконтрастного кольца позволяет контролировать перемещение фиброзного кольца клапана сердца. Вязаное покрытие выполнено из полиэфирной нити. Каждое кольцо КОМП–01 поставляется на оправке из поликарбоната, состоящей из кольца и калибра. Разрешены к применению в медицинской практике приказом Минздрава России № 386 от 20.03.86. С 1999 года кольца опорные митральные имеют Сертификат соответствия России.



Рис. 6.3. Кольца опорные митральные КОМП–01

Фетр медицинский из ФТОРОПЛАСТА–4 (рис.6.4) используется для лечения дефектов межжелудочковой перегородки сердца, в качестве подкладочного материала под хирургические нити и в качестве материала каркасных имплантатов. Волокнистая структура фетра с определенной плотностью обеспечивает прорастание имплантата в организме. Высокая прочность на разрыв фетра медицинского из ФТОРОПЛАСТА–4 позволяет надежно закрепить имплантат нитью при хирургических операциях. Фетр медицинский изготовлен из 100 % волокна фторопласта–4 и выпускается в виде пластин размером 90х90 мм. Толщина пластин: 1,0; 1,5; 2,0 мм. Разрешен к применению в медицинской практике при-

казом Минздрава России № 177 от 23.02.76. С 1999 года ФЕТР МЕДИЦИНСКИЙ имеет Сертификат соответствия России.



Рис. 6.4. Пластины фетра медицинского из фторопласта 4

Углеситалл УСБ — изотропный пироуглеродный материал (рис. 6.5), получаемый путем направленной кристаллизации при пиролизе углеводородов с добавлением хлоридов металлов. Обладает высокими физико-механическими и антифрикционными свойствами, устойчив к высоким температурам и агрессивным средам, биологически инертен, газонепроницаем. Углеситалл применяют для изготовления уплотнений, работающих в высокоагрессивных средах: деталей для химической аппаратуры, устройств для разливки цветных металлов, индикаторных электродов, электродов для хемотропных приборов. Углеситалл широко применяется в изделиях медицинской техники, в частности, для изготовления деталей искусственных клапанов сердца. Углеситалл **УСБ** допущен Министерством Здравоохранения России к имплантации в сердце человека. Физические свойства углеситалла УСБ приведены в табл. 6.2.



Рис. 6.5. Поверхность углеситалла при 5000 увеличении

"УСБ-Т" и "УСБ-М" выпускается в виде пластин размерами 35x60x6 мм (не более). Пример записи обозначения пластины из углеситалла марки "УСБ-Т" длиной 24 мм, шириной 24 мм и толщиной 5 мм при заказе: Пластина "УСБ-Т" 24*24*5 ТУ 044-38-95.

Таблица 6.2

Физико-химические свойства Углеситалла "УСБ-Т" и "УСБ-М"	
Плотность, кг/м^3	1800 – 2100
Предел прочности $\sigma_в$, кг/мм^2, 0-200 °С: • при растяжении • при изгибе • при сжатии	 10 20 50
Модуль упругости, Па	$(2,5 – 2,7)\cdot 10^{10}$
Коэффициент Пуассона	0,27
Микротвердость, кг/мм^2: • УГЛЕСИТАЛЛ "УСБ-Т" • УГЛЕСИТАЛЛ "УСБ-М"	 110 (не менее) 85 – 120
Удельное электросопротивление, Ом·мм^2/м	15
Коэффициент термического расширения, 1/град	$5,5\cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·град	25

6.4. Материалы электродов для электрокардиографов и электроэнцефалографов

Основные требования к электродам: малое контактное сопротивление, малая и стабильная поляризация, надежность крепления.

В настоящее время известны следующие материалы для электродов:

1. AgCl – хлорсеребряные электроды. Один из самых распространенных электродных материалов.
2. Серебро, золото, платина (Ag, Au, Pt). Хорошие характеристики, но дорогие. Часто медные и латунные электроды покрывают Ag, Au, Pt.
3. Графит (С) – углеродные электроды (УЭ). УЭ имеют практически нулевую поляризацию, но достаточно высокое контактное сопротивление.
4. Нержавеющая сталь. Электроды оборачиваются гигроскопическим материалом и смачиваются раствором NaCl. Характеристики хуже, чем у первых трех, но дешев и не ржавеет.
5. Проводящая керамика. Обладает отличными электрическими свойствами, но требует сложного ухода и часто выходят из строя при использовании ненадлежащего геля.
6. Токопроводящая резина. Приемлемые электрические характеристики, но свойства нестабильны, резина быстро стареет. Практически не применяется.

6.5. Сплавы и изделия с памятью формы в медицине

“Эффект памяти механической формы” заключается в свойстве пластически деформированного при повышены температурах образца, а затем деформированного при данной температуре до потери первоначальной формы, восстанавливать ее при повторном нагреве.

Деформирование при повышенных температурах проводят в диапазоне температур существования в материале, из которого изготовлен образец, устойчивой фазы. Низкотемпературное деформирование осуществляют при температурах фазового превращения или близких к ним. Важнейшим компонентом сплавов с “ эффектом памяти формы” является термоупругий мартенсит.

Необходимым условием существования термоупругого мартенсита [10] является когерентность (согласованность) кристаллических решеток мартенсита и матричной фазы (рис. 6.6).

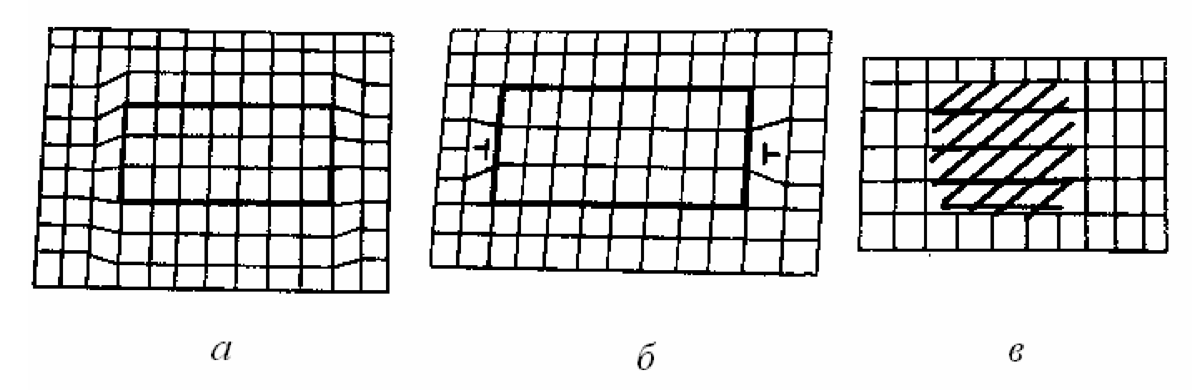


Рис. 6.6. Структура межфазных границ в сплаве: а– когерентных, б – частично когерентных, в - некогерентных

Рост кристаллов мартенсита заканчивается при нарушении когерентности межфазных границ. Новые фазы в системе растут при уменьшении свободной энергии системы ΔF. Если увеличение энергии упругой деформации ΔF_E и уменьшение свободной химической энергии ΔF_V уравнивается, $\Delta F = 0$. В этом случае прекращается рост кристаллов мартенсита. Установившееся равновесие фаз зависит от температуры, т.е. является термоупругом. Температурный гистерезис превращения мартенсита в сплавах с “эффектом памяти формы” обычно невелик.

“Эффект памяти механической формы” в металлических материалах обусловлен образованием двойников в решетке при механической нагрузке и исчезновением их при нагревании.

“Эффект памяти механической формы” характерен для ряда сплавов: Ti – Ni, Ti – Au, Ti – Pd, Ti – Pt, Au – Cd, Cu – Zn. Наиболее

типичным представителем таких материалов является сплав Ti – Ni (нитинол).

Температурный интервал реализации “эффекта памяти” в интервалах 550 – 600 °С. Материал имеет следующие характеристики: Е=66.7…72,6 МПа, G= 22,5… 24,5 ГПа, $\sigma_в$=735…970 МПа, δ= 2…27 %; ρ = 65…76 мк Ом·см, температура плавления – $T_{пл}$ = 1250…1310 °С., плотность – 6440 кг/м^3.

Сплавы с эффектом памяти используют для изготовления экстракторов различной конструкции для безоперационного удаления камней, преимущественно из нижнего и среднего отделов мочеточников (урологический аппарат “Захват-М” - изделие Республиканского инженерно-технического центра СО РАН, г. Томск), дилататоров и каркасов, используемых при холецистогастроанастамозе, почечно-кишечном анастамозе, опухоли ворот печени, бужировании холедоха и печеночного протока и т.п.

В космической технике эти материалы применяют для изготовления самораскрывающихся антенн космических кораблей в устройствах пожаротушения и др.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к материалам, применяемым в биологических и медицинских аппаратах и системах?
2. Назовите материалы для изготовления хирургических инструментов.
3. Назовите материалы, применяемые для искусственных сосудов и для других имплантатов.
4. Какие материалы применяют для изготовления электродов для электркардиографов и электроэнцефалографов?
5. Как проявляется эффект памяти механической формы?
6. Приведите примеры применения материалов с эффектом памяти формы в медицине и технике.
7. Какой компонент является неотъемлемой частью сплавов с эффектом памяти формы? Условия существования этого компонента.

Глава VII. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОМЕХАНИКИ

Микромеханика отнесена к одному из 100 великих чудес техники. Японская фирма “Тошиба” изготовила электромагнитный двигатель диаметром 0,8 мм и весом всего 4 миллиграмма. Немецкая фирма “Микротех” создала прототип подводной лодки длиной 4 мм и диаметром 0,65 мм. Ходовой винт лодки вращается с помощью внешнего переменного магнитного поля. Скорость перемещения лодки – 1 м/час. Лодка снабжена фрезой, с помощью которой можно срезать склеротические бляшки в кровеносных сосудах. Подводная лодка заглатывается пациентом в капсуле. После растворения оболочки капсулы миниатюрная подводная лодка доставляет лекарство точно в нужное место организма пациента.

7. Материалы для микромеханических приборов

Одним из практических приложений микромеханики являются микромеханические гироскопы (ММГ) и акселерометры (ММА) – датчики первичной информации малогабаритных инерциальных навигационных систем. Интегрированные со спутниковыми навигационными системами они, обеспечивают необходимую точность определения параметров ориентации и координат подвижных объектов: летательных аппаратов, морских судов, наземных транспортных средств, робототехнических комплексов. Патенты на различные технические решения в области разработки микромеханических чувствительных элементов получены рядом ведущих зарубежных фирм (Draper, Laboratory, Rockwell International, Analog Devices, Murata и др. С определенным отставанием разработки микромеханических гироскопов и акселерометров ведутся в России.

Анализ мировых тенденций развития микромеханических акселерометров и датчиков угловых скоростей показывает, что сейчас в основном все усилия сосредоточены на разработке плоскостных, монолитных структур типа акселерометров фирмы Analog Devices или датчика угловой скорости Лаборатории Драйпера. Отличительной особенностью таких приборов является то, что они изготавливаются методами микроэлектронной технологии практически без операций механической сборки. Только в этом случае полностью реализуются преимущества микротехнологии: возможность изготовления чувствительных элементов с габаритами в пределах одного миллиметра и с точностью до долей микрона, хорошая стыковка с обслуживающей электроникой и групповые методы обработки.

Электромеханические узлы приборов этих типов формируются из неметаллических материалов (поликристаллический и монокристаллический кремний, плавленый кварц, карбид кремния и др.) методами фотолитографии и изотропного или анизотропного травления вместе с элементами электроники возбуждения, датчиками съема и преобразования полезного сигнала, элементами формирования обратных связей.

В результате совместной работы ФНПЦ "Раменское приборостроительное конструкторское бюро" (РПКБ), физико – технического института РАН (ФТИАН, г. Москва) и НИИМЭ завод "Микрон" (г. Зеленоград) была разработана конструкция и технология изготовления микродатчика ускорений [4]. Общий размер кристалла из поликристаллического кремния, в структуре которого размещены микромеханические и микроэлектронные элементы акселерометра, составляет 1,5x 1,5 мм. Отдельные фрагменты изготовленного чувствительного элемента датчика ускорения приведены на рис.7.1.

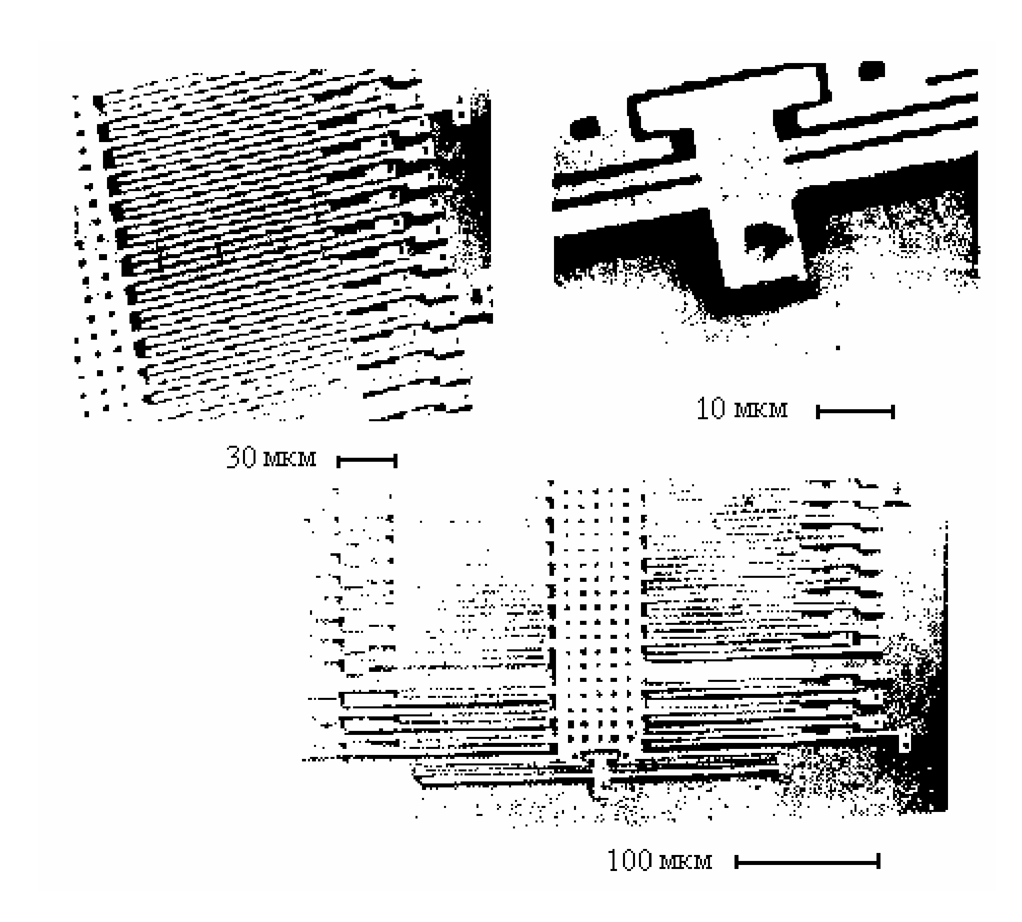


Рис. 7.1. Фрагменты кристалла микромеханического датчика ускорений

Глава VIII. ОСНОВЫ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ

Выбор материалов для изготовления технических изделий начинается с анализа номенклатуры материалов. Его цель - отыскание материалов с наилучшим сочетанием эксплуатационных параметров. Затем, исходя из технологических свойств отобранных материалов, необходимо рассмотреть варианты технологий изготовления изделий с учётом массы, размеров, конструктивных особенностей и т.д. Материалы должны быть доступными, иметь невысокую стоимость.

8.1. Выбор материалов при подготовке производства

8.1.1. Разработка изделия

Для организационно-технической структуры приборостроения характерна взаимосвязь конструкции и технологии изделий. В процессе подготовки производства закладываются технические основы получения изделий, обладающих заданной потребительской стоимостью (т.е. полезностью, свойством удовлетворять потребности человека), при наименьших затратах. На рис 8.1 показана схема выбора материалов на начальном этапе подготовки производства.

Исходным документом для проектирования технических изделий и проведения исследований является техническое задание (ТЗ). Путем анализа условий нагружения, воздействия окружающей и рабочей сред, конструктивных особенностей аналогичных (если такие есть) изделий, условий надежности, ресурса, технологичности, определяют и регистрируют в ТЗ этапы проведения работ, необходимую техническую документацию, показатели качества изделия, эксплуатационные и технико-экономические требования.

На основании ТЗ определяют группу материалов, эксплуатационные и технологические свойства которых будут подвергнуты дальнейшему анализу по критериям экономической эффективности. В приборостроении используют широкую номенклатуру материалов, количество технических характеристик которых превышает миллион. Элементами системного подхода к выбору материалов на этом этапе являются: точное определение параметров материалов и их качественных характеристик; систематизированное и целенаправленное хранение характеристик в компьютере; обобщение данных о возможностях приобретения сырья и полуфабрикатов.

Снижение материалоёмкости – один из главных факторов, определяющих выбор материала при организации производства. 75 % во-

просов, касающихся экономии материалов для технических изделий, решаются на стадии исследования и разработки продукции, до 13 % - при технологической подготовке производства 12 % - в процессе изготовления продукции [8].

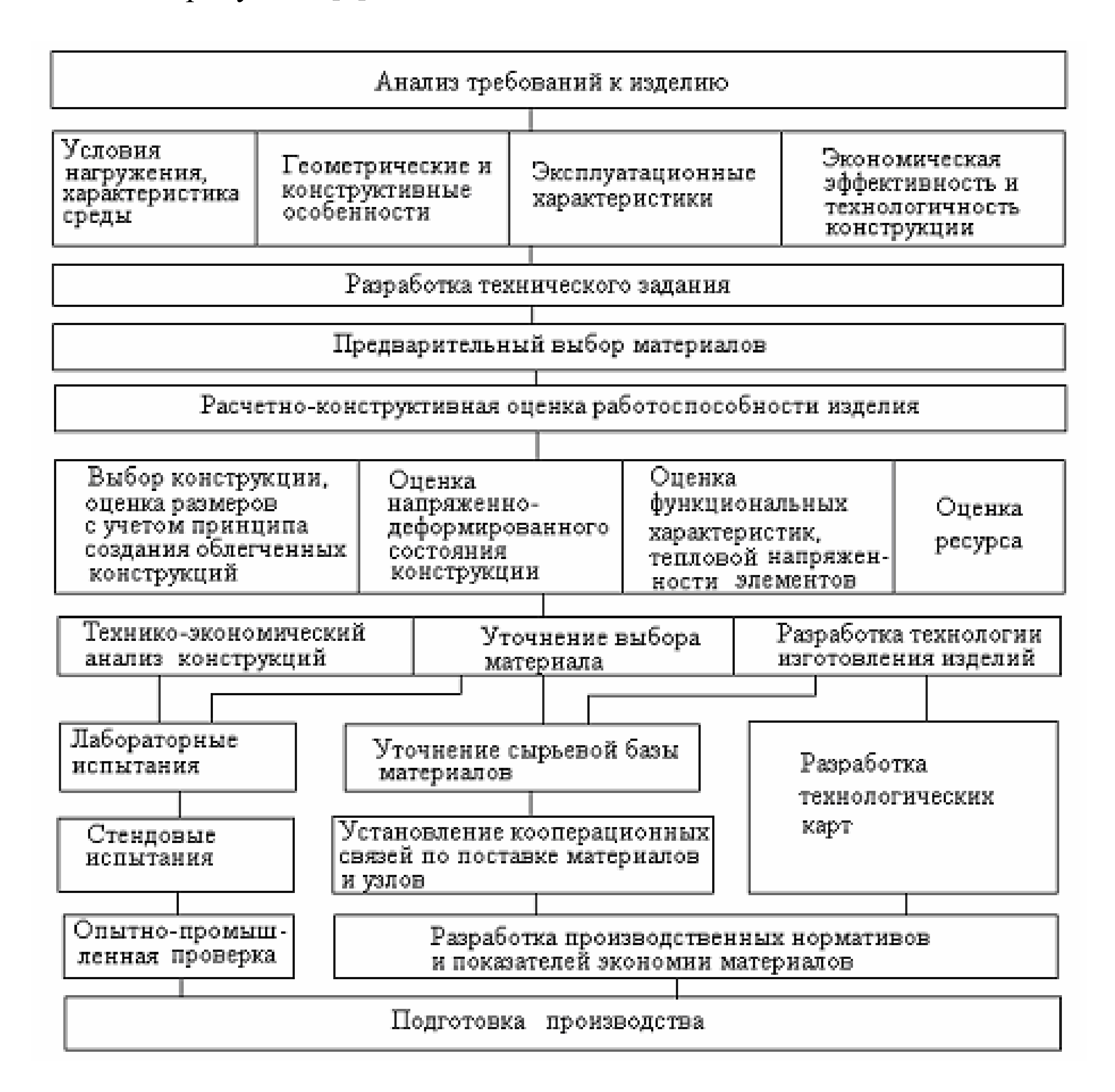


Рис. 8.1. Схема выбора материала или требований к новому материалу

8.1.2. Технологическая подготовка производства

Одним из основных критериев при выборе технологии изготовления изделия является уменьшение потерь материалов в процессе их обработки. Основы ресурсосберегающих технологий закладываются при сотрудничестве конструкторов и технологов. Снижению потерь мате-

риалов в процессе технологической обработки способствует межпроизводственная стандартизация с учетом партнеров по кооперации и технико-экономическое обоснование норм расхода материалов.

Этот этап подготовки производства заканчивается разработкой технологических карт - документов, в которых зафиксирован процесс обработки детали, указаны последовательность технологических операций, материалы, производственное оборудование и технологическая оснастка, технологические режимы и операционное время, квалификация работников и др.

На рис. 8.2 приведена схема взаимосвязи технологических и сопряженных с ними факторов, которые необходимо учитывать при оценке эффективности замены материалов. Стратегию выбора материала по технологическим критериям для конкретного изделия можно определить, установив значимость и взаимообусловленность технологических и связанных с ними факторов. Рассмотренные этапы системного подхода к выбору материалов показывают, что техническое обоснование структуры материалопотребления необходимо проверять по критериям общественной целесообразности.



Рис. 8.2. Совокупность факторов, обусловливающих целесообразность замены материалов при изготовлении (жирные стрелки - прямое влияние, тонкие – косвенное)

8.2. Стоимость и эксплуатационные свойства изделий

В процессе проектирования необходимо принимать такие решения, чтобы выполнение основной функции или группы функций изделия было связано с минимальными затратами общественного труда. Такой подход позволяет уже на ранней стадии проектирования изделия ориентироваться не только на технические возможности, но и на критерии общественной целесообразности производства.

Блок стоимость - эксплуатационные свойства включает следующие взаимосвязанные факторы. Свойства изделий формируются под влиянием общественных и индивидуальных потребностей человека, условий производства и т.д. Основными свойствами изделия являются: технический принцип, конструктивная форма, эксплуатационные параметры; технологичность, трудоемкость и другие показатели, зависящие от условий производства; ремонтопригодность и др. Эти свойства реализуются через материалы: основные, используемые в производстве; полуфабрикаты и комплектующие узлы, поставляемые по кооперации; технологические материалы и материалы для ремонта изделий. Стоимость изделия определяется количеством труда, затраченного на производство: труда, овеществленного в материалах; живого труда в процессе производства; труда на проектирование и исследование изделия, его эксплуатацию и поддержание в исправном состоянии.

В процессе технико-экономического анализа разрабатываемое изделие сравнивают с базовым. За базу сравнения принимают конструкцию, технологический процесс или материал, наиболее близкие к разрабатываемым по назначению, содержанию или структуре. Лучшим вариантом является такой, при котором наиболее высокие по сравнению с базовым вариантом эксплуатационные параметры изделия достигаются при наименьших затратах на производство.

Последовательность логических операций, приводящих к выбору материала, определяется конкретными условиями (рис. 8.3) – свойствами изделий, условиями производства, общественной необходимостью в изделиях и т.д.

Выбор материалов – основа для разработки комплекта конструкторской и технологической документации, наличие которой дает основания приступить к организации производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переработка оставшегося на Земле сырья, добыча его из всё более глубоких слоев земли требует высоких затрат энергии и современных

технических средств. Существующие технологии в недостаточной степени обеспечивают охрану природы и полное использование сырья. Важную роль приобретает использование вторичного сырья. Создана научная база, позволяющая превратить все твёрдые, жидкие и газообразные отходы промышленности, сельского хозяйства, бытовые отходы в исходные вещества, не нанося вреда природе. Задача материаловедения состоит в том, чтобы в ближайшем будущем обеспечить кругооборот материалов, применяя использованные материалы и изделия как вторичное сырьё.

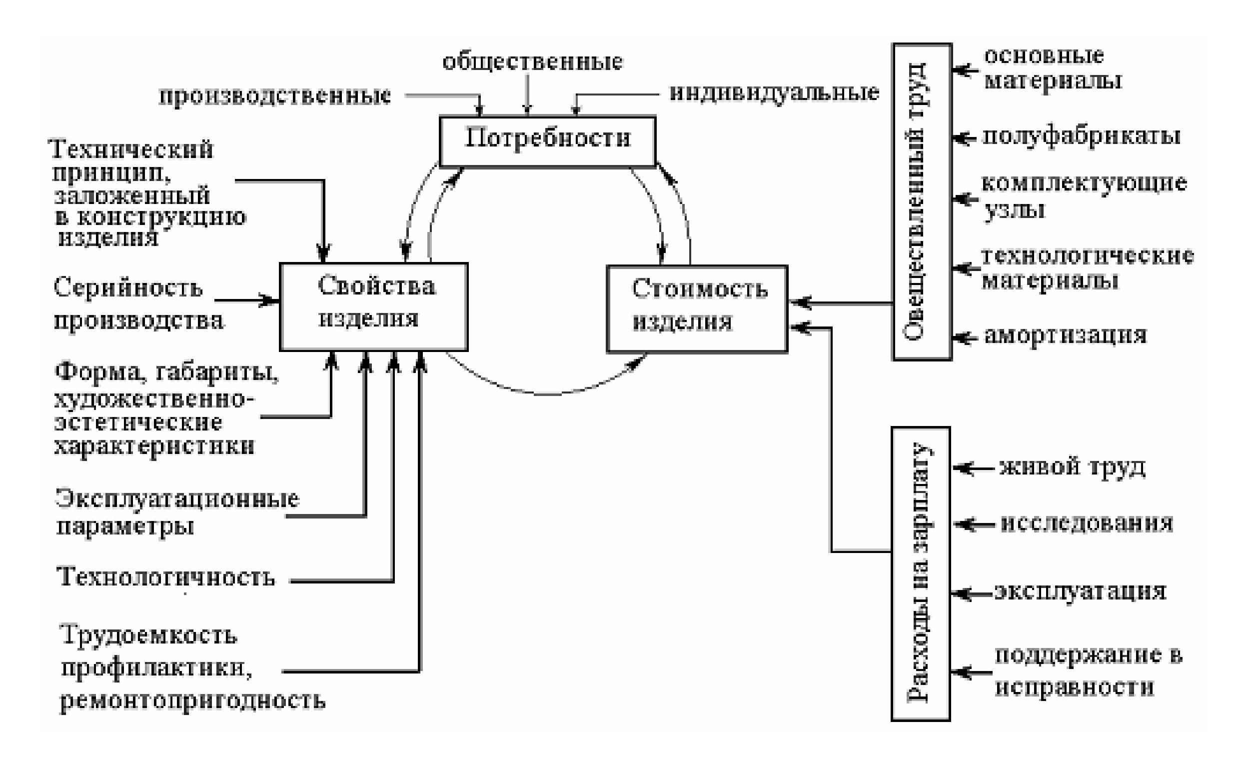


Рис. 8.3. Факторы, определяющие стоимость изделия

Контрольные вопросы

1. Опишите алгоритм выбора материала на этапе проектирования технического изделия.
2. Какой процент снижения материалоемкости изделия характерен для разных этапов жизненного цикла прибора: исследования и разработка, технологическая подготовка производства, в процессе изготовления продукции?
3. Назовите факторы, обусловливающие целесообразность замены материалов при изготовлении прибора (технического изделия).
4. Назовите факторы, определяющие стоимость изделия.
5. Предложите пример безотходного использования материала.

ЛИТЕРАТУРА К ЧАСТИ I

1. Арефьев В.П., Исаев В.П., Сорокин А.В., Шилов И.Ф. и др. Применение порошковых высококремниевых сплавов на алюминиевой основе в гироприборах ракетно-космической техники// Гироскопия и навигация. – 2002. – № 4(39). – С.23 – 28.
2. Батаев А.А.., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применгение: Учебник. – Новосибирска: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с. – (Серия «Учебники НГТУ»)
3. Биомедицинское материаловедение: Учебное пособие для вузов/ С.П. Вихров, Т.А. Холомина, П.И. Бегун, П.Н. Афонин – М.: Горячая линия – Телеком, 2006 – 383 с.
4. Будкин В.Л., Джанджгава Г.И., Ларин П.В., Минаев Ю.А. и др. Разработка конструкции и технологии изготовления микродатчика ускорений// Гироскопия и навигация. – № 4(31). С. 30 – 41.
5. Богородицкий Н.П. и др. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1969. – 408 с.
6. Гормаков А.Н. Материаловедение. Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 120 с.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем.– М: Мир,1982.– 520 с.
8. Лахтин Ю.М., Леонтьев В.П. Материаловедение. Учебник для втузов. – 3 изд., – перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
9. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник/ Под ред. Пятина Ю.М- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.– 528с.
10. Материаловедение и конструкционные материалы: Учеб. пособие для вузов/ Л.С. Пинчук, В.А. Струк, Н.К. Н.К. Мышкин, А.И. Свириденок; Под ред. В.А. Белого. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 461 с.
11. Орлов К.Я., Пархимович В.А. Авиационные материалы. – М.: Транспорт, 1993. – 207 с.
12. Перечень полимерных материалов, рекомендуемых для изделий медицинского назначения (по состоянию на 1.01.1987 г.) Министерство здравоохранения СССР, Всесоюзный научно-исследовательский и испытательный институт медицинской техники.–Москва, 1987.–56 с.
13. Справочник конструктора-приборостроителя. Проектирование. Основные нормы/ В.Л. Соломахо, Р.И. Томилин, Б.В. Цитович, Л.Г. Юдович. – Мн.: Выш. шк., 1988.– 272 с.
14. Физические величины: Справочник/ А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.: Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1332 с.

ЧАСТЬ II. ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Глава IX. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ЛИТЬЕМ

9.1. Требования к литым заготовкам

Литьем называется процесс получения заготовок и деталей путем заливки расплавленного металла (сплава) в форму с последующим его охлаждением и затвердеванием. Этим способом изготовляют в основном заготовки сложной формы, когда нельзя сделать детали соответствующего качества более экономичными методами, например, коробчатые детали открытого и закрытого типа, в которых монтируют рабочие механизмы приборов, а также детали, связывающие отдельные элементы приборов – кронштейны, шарниры и др. Размеры литых заготовок от 1 мм до десятка метров.

Отливки можно изготовлять из различных материалов. Процесс получения отливок состоит из следующих основных этапов: изготовления формы; плавки металла; заливки жидкого металла в форму; охлаждения и затвердевания металла в форме; извлечения заготовки из формы; удаления литниковой системы и зачистки отливки.

В приборостроении находят применение литье в песчаные формы, в кокиль, центробежное литье, литье под давлением, литье в оболочковые формы и литье по выплавляемым моделям.

Выбор того или иного способа литья определяется типом производства, сложностью конфигурации, размерами и материалом детали, требуемой точностью.

Эффективность способа литья зависит от его точности. При повышении точности литья может быть исключена необходимость обработки на станках или, по крайней мере, могут быть максимально уменьшены припуски на обработку. Погрешность отливки зависит от качества изготовления модели и ее формы, а также от качества процессов заливки и остывания. При конструировании детали и разработке технологического процесса ее изготовления необходимо учитывать главнейшие литейные свойства сплава: жидкотекучесть и усадку. При недостаточной жидкотекучести металла или малой толщине стенки отливки заполняется не вся форма, и деталь бракуется.

Материалами для литых заготовок служат черные и цветные металлы и их сплавы (сталь, чугун, медные, алюминиевые, магниевые, цинковые сплавы, сплавы для получения постоянных магнитов и др.). Из черных и цветных металлов можно получить заготовки литьем в

землю и оболочковые формы, по выплавляемым моделям и в формах для центробежного литья. Для литья в кокиль наиболее часто применяют алюминиевые, магниевые, медные сплавы и реже чугун; для литья под давлением – алюминиевые, магниевые, медные и другие легкоплавкие сплавы. При выборе сплава для отливки необходимо пользоваться гостированными литейными сплавами и только в виде исключения – сплавами, рекомендованными ведомственными нормалями.

Конструкция детали должна обеспечивать беспрепятственное извлечение отливки из формы. Это достигается приданием поверхностям отливки, перпендикулярным плоскости разъема, формы уклонов и конусности. Толщина стенок должна быть как можно меньшей и одинаковой для обеспечения равномерного охлаждения (внутренние стенки могут быть на 15–20% тоньше наружных, исходя из условий теплоотдачи). Формы отливки должны быть простыми. Нужно избегать резких переходов от толстых стенок к тонким, резких, без скруглений поворотов, тонких перемычек и т. п. Сопряжения стенок должны быть плавными с возможно большим радиусом переходов, благодаря чему не создаются дополнительные сопротивления, снижающие скорость потока металла, и не ускоряется его остывание. Следует исключать большие местные скопления металла, возникающие в пересечениях стенок отливок, приливах, бобышках и т.п., что приводит к неравномерному остыванию металла и образованию усадочных раковин.

9.2. Литье в песчаные формы

Продукцией литейных цехов являются отливки, получаемые в литейных формах при заполнении их жидким сплавом.

Литейная форма – это-форма, изготовленная из жаропрочного материала и предназначенная для заливки жидкого металла и получения отливок.

Отливкой называется заготовка изделия (иногда готовое изделие), полученная при заливке жидкого металла в литейную форму, в которой он затвердевает.

Литейная модель является приспособлением, предназначенным для получения в литейной форме рабочей полости будущей отливки. Материалами для модели служат древесина, пластмасса, металл, гипс и т.п.

В литейном производстве находят также применение приспособления, называемые опоками и служащие для удержания формовочной песчаной смеси (рис. 9.1). Простейшая опока для одноразовой заливки

представляет собой жесткую раму, состоящую обычно из двух половин – верхней и нижней, которые фиксируются и скрепляются между собой при сборке формы перед заливкой.

Литье в песчаные формы – наименее совершенный способ литья. Качество поверхности, точность размеров – самые низкие, вследствие чего трудоемкость последующей механической обработки бывает высокой. Однако литье в песчаные формы широко применяется на заводах мелкосерийного и опытного производства, главным образом при отливке крупных деталей, где оно является экономически оправданным. В связи с трудоемкостью процесса большое значение имеет его автоматизация, особенно комплексная.

Одним из факторов, определяющих погрешности размеров при литье в песчаные формы, является точность изготовления моделей. Замена деревянных моделей моделями из пенополистирола позволяет повысить производительность труда и точность изготовления отливок, т.к. отпадает необходимость извлечения модели и, следовательно, при-

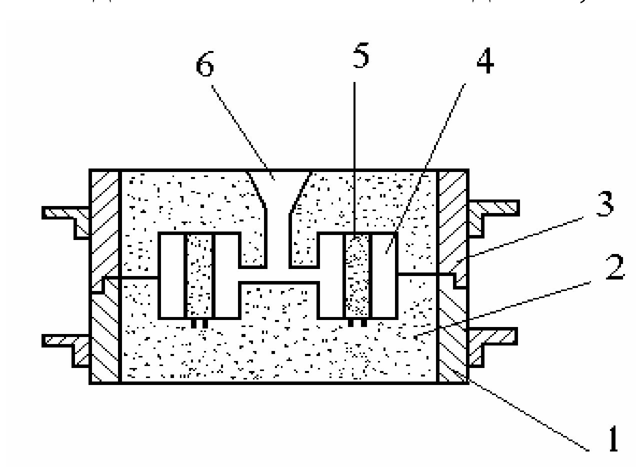


Рис. 9.1. Песчаная форма: 1 – нижняя опока; 2 – формовочная смесь; 3 – верхняя опока; 4 – рабочая полость формы; 5 – стержень; 6 – литниковый канал

менения разъемных литейных форм. При этом стоимость модели из пенополистирола составляет примерно 30% стоимости деревянной модели. При литье в песчаные формы толщина стенок отливок цветных сплавов составляет 2,5–120 мм для мелких деталей и 5–400 мм – для средних.

9.3. Литье в кокиль

Литье в кокиль более производительно, чем литье в песчаные формы, так как исключается необходимость формовки.

Кокилем называется металлическая (как правило, чугунная или стальная) литейная форма для получения в условиях приборостроения отливок преимущественно из цветных сплавов. Кокили более теплопроводны, чем песчаные формы, благодаря чему скорость затвердевания жидкого металла в них выше. Быстрая кристаллизация способствует удержанию части растворившихся в металле газов, поэтому структура отливок получается равномерной и мелкозернистой.

Припуски на механическую обработку, оставляемые при литье в кокиль, невелики (0,5–1,0 мм). Точность изготовления деталей (12–14 квалитет) выше, чем при литье в песчаные формы. Шероховатость поверхности Rz 80–Rz 20.

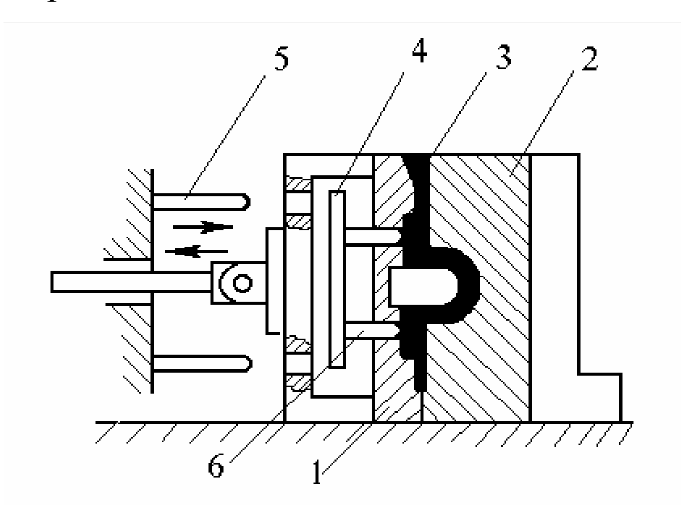


Рис. 9.2. Кокиль с вертикальной плоскостью разъема:
1 – подвижная часть формы; 2 – неподвижная часть формы; 3 – жидкий металл; 4 – плита; 5 – стержень; 6 – выталкиватель

Металлическая форма (рис. 9.2) состоит из двух половин: подвижной 1 и неподвижной 2. После заливки формы жидким металлом 3 и соответствующей выдержки подвижную половину отодвигают от неподвижной. Отлитая заготовка остается в подвижной половине. При дальнейшем движении плита 4 упирается в неподвижные стержни 5 и отливка выталкивателями 6 удаляется из рабочей полости подвижной половины.

Процесс литья в кокиль разделяется на три этапа: подготовка кокиля (очистка, смазка трущихся поверхностей, подогрев перед окрашиванием, окрашивание, подогрев перед заливкой); заливка сплава в кокиль; разборка кокиля и удаление отливок.

Окрашивание производится с целью улучшения условий заполнения и предохранения ее стенок от приваривания. Краска наносится с помощью пульверизатора. Окраска может производиться раствором жидкого стекла в воде, смешанным с порошком графита и мыла, или раствором графита в минеральном масле. Прогрев формы осуществляется для лучшего заполнения ее расплавленным металлом и предупреждения образования трещин в отливках. Для получения отливок не-

сложной конфигурации кокиль нагревают до 150–200°С, для сложных отливок до 300–350°С. Разбирают кокиль при его температуре 300–350°С.

Основное влияние на точность изготовления при литье в кокиль оказывают погрешности формы, усадка литейного сплава и колебания размеров формы в результате температурных изменений в процессе литья, которые определяются расчетом. Так, отклонения усадки сплава $\delta_{ус}$ определяется по формуле

$$\delta_{ус} = L_{д} [\alpha_{д\,max} (t_{д\,max} - 20) - \alpha_{д\,min}(t_{д\,min} - 20)] + $$
$$+\alpha_{ф}(t_{к\,max} - t_{к\,min}), \qquad (9.1)$$

где $L_{д}$ – длина детали при 20°С; $\alpha_{д}$ – усадочный коэффициент материала детали; $\alpha_{ф}$ – среднее значение коэффициента теплового линейного расширения формующих элементов кокиля в диапазоне температуры от 20°С до $t_{ф}$; $t_{д}$ и $t_{к}$ – соответственно температура детали и кокиля в момент начала усадки.

Алюминиевые сплавы заливают в кокиль при температуре 680–760°С, цинковые – 450–550°С, оловянные и свинцовые 350–400°С. При литье медных сплавов и стали стойкость кокиля резко уменьшается. Ориентировочно стойкость стальных кокилей характеризуется следующим числом изготовленных отливок: цинковых сплавов – 150000, магниевых – до 75000, алюминиевых – до 50000, медных – до 10000 и стальных – до 500.

Стоимость оборудования при литье в кокиль сравнительно невелика. Однако изготовление самого кокиля требует значительных затрат средств и времени. При стандартизации отдельных элементов кокилей их стоимость может быть значительно снижена.

Кокильное литье целесообразно применять в массовом и серийном производстве для простых деталей и деталей средней сложности. Конструкция деталей, пригодных для кокильного литья, должна отвечать следующим требованиям: отсутствие впадин и выступов, мешающих выемке отливок из кокиля; отсутствие резких переходов в толщине стенок; закругление сопрягаемых поверхностей должно выполняться радиусом не менее 3 мм; уклон наружных и внутренних поверхностей по отношению к плоскости разъема кокиля должен быть не менее 1 град.; наименьшая толщина стенок для мелких деталей (весом до 1 кг) должна быть 2,5–4 мм, а для алюминиевых – 2–2,5 мм.

9.4. Литье под давлением

Процесс литья под давлением заключается в том, что расплавленный металл подается под давлением с большой скоростью в рабочую полость стальной формы.

Литье под давлением в приборостроении является наиболее распространенным и производительным способом получения деталей из цветных металлов массой до 16 кг, так как по сравнению с другими способами литья имеет ряд существенных преимуществ. Это самый производительный метод литья, позволяющий получить 60–150 заготовок в час при одногнездовой форме и свыше 500 заготовок в час при многогнездовой.

Кроме того, этот способ позволяет изготавливать особо сложные детали, в том числе и армированные, и обеспечивает высокую точность отливок (8–12 квалитет точности, Rz 40–Rz 6,3). Такая высокая точность резко уменьшает, а в ряде случаев полностью исключает необходимость последующей механической обработки детали, благодаря чему снижается себестоимость изделия в целом. Наконец, высокое давление подачи металла способствует повышению механических характеристик сплава, из которого отливается деталь. Толщина стенок отливок может составлять 0,6 мм.

Скорость подачи металла при литье под давлением может достигать 80 м/с, давление до 500 МПа. Это необходимо для быстрого заполнения формы, пока металл не потерял текучести. Указанные параметры должны быть тем выше, чем меньше толщина стенок отливаемой детали и сложнее ее конфигурация и чем больше теплопроводность материала, из которого сделана форма. Процесс литья под давлением осуществляется с помощью литьевых машин, которые подразделяются на машины с горячей камерой сжатия и машины с холодной камерой сжатия. Существует два основных типа машин с горячей камерой сжатия: поршневая и компрессорная.

Поршневая машина, схема которой представлена на рис. 9.3, состоит из тигля для расплавленного металла, формы и механизма, перемещающего подвижную часть формы при освобождении отливки. Расплавленный металл 1 поступает в камеру давления 2 по каналам 3. При движении поршня 4 вниз металл из камеры давления 2 по подводящему каналу 5 поступает в форму 6. Подогрев тигля осуществляется с помощью подогревательного устройства 7.

Поршневые машины применяются для литья легкоплавких сплавов, не содержащих алюминия, который интенсивно разрушает поверх-

ность поршня и камеры давления. К таким сплавам можно отнести свинцовые, оловянные и цинковые.

Поршневые машины применяются для литья легкоплавких сплавов, не содержащих алюминия, который интенсивно разрушает поверхность поршня и камеры давления. К таким сплавам можно отнести свинцовые, оловянные и цинковые.

Компрессорная машина, схема которой представлена на рис. 9.4, отличается тем, что металл из камеры давления 1 подается не поршнем, а сжатым воздухом от компрессора по воздуховоду 2. Металл из тигля поступает в камеру давления по каналу, который открывается при перемещении клапана 3 вниз.

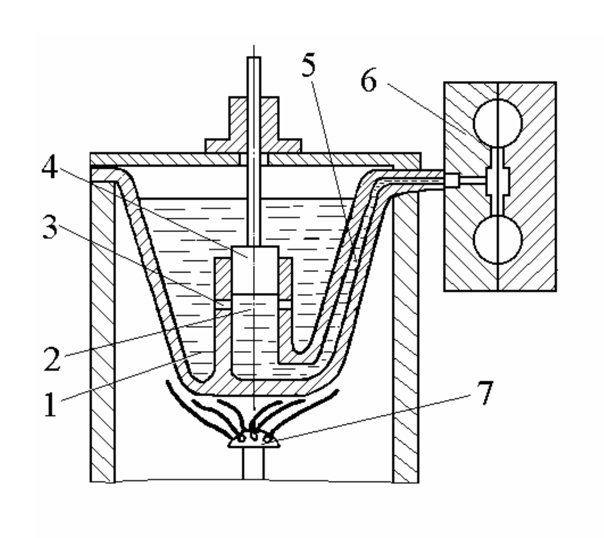


Рис. 9.3. Схема поршневой машины с горячей камерой прессования:
1 – расплавленный металл; 2 – камера давления; 3 – канал для заливки камеры прессования; 4 – поршень;
5 – подводящий канал; 6 – форма;
7 – подогревательное устройство

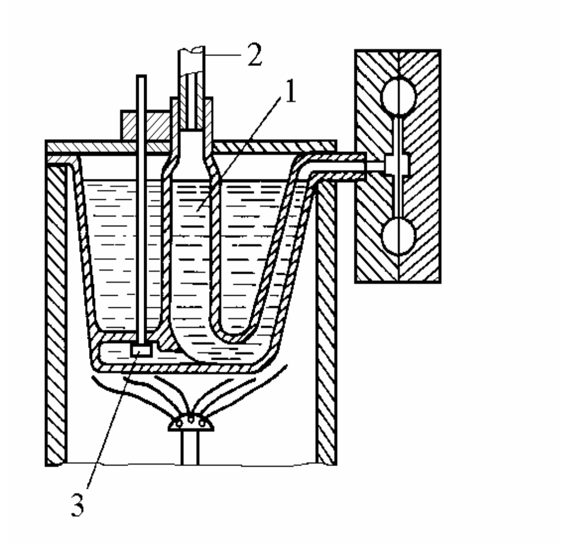


Рис. 9.4. Схема компрессорной машины: 1 – камера давления;
2 – воздуховод; 3 – клапан

Машины с холодной камерой сжатия применяют для литья деталей из алюминия и его сплавов. Известны два основных типа таких машин: с вертикальной камерой сжатия и горизонтальной камерой сжатия. В этих машинах плавильное устройство отделено от механизма, подающего металл в форму.

Машина с вертикальной камерой сжатия работает по схеме, изображенной на рис. 9.5. К цилиндру 2, в котором помещается поршень - выталкиватель 1, примыкает форма 4, состоящая из двух половин. Расплавленный металл 3 заливается в цилиндр (камеру сжатия) ложкой 7 и

вводится плунжером 6 в рабочую полость 5 формы. При обратном ходе плунжера поршень поднимается, удаляя излишек металла 8 из камеры сжатия. Одновременно с этим форма открывается, и отливка извлекается. Работа машины с горизонтальной камерой аналогична рассмотренной.

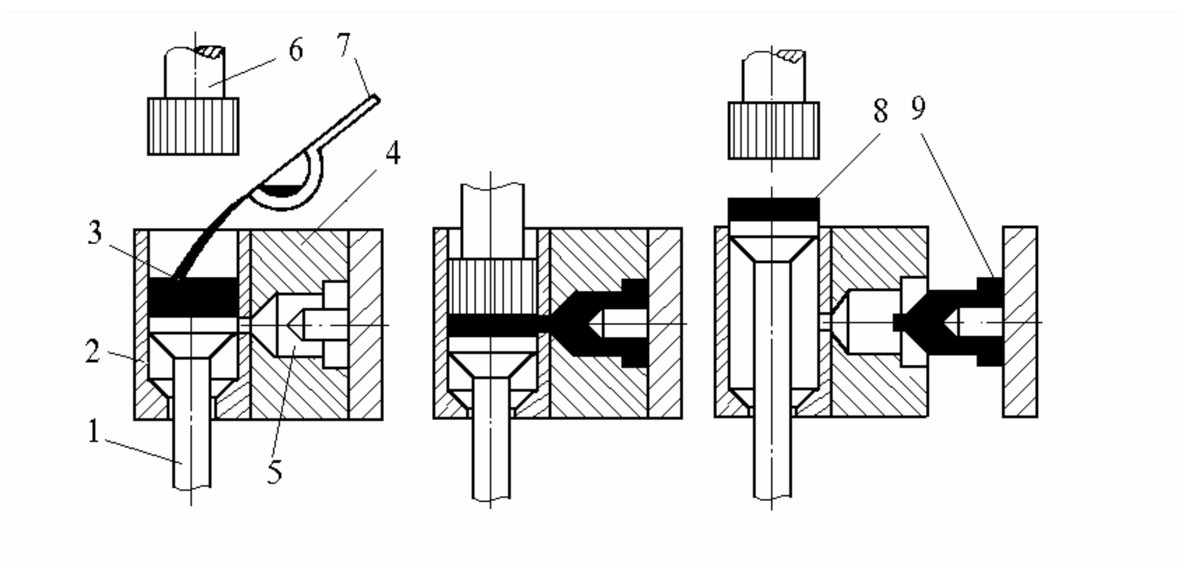


Рис. 9.5. Вертикальная камера прессования:
1 – поршень-выталкиватель; 2 – цилиндр; 3 – расплавленный металл;
4 – форма разъемная; 5 – рабочая полость формы; 6 – плунжер;
7 – ложка; 8 – пресс-порошок; 9 – отливка

Машины с холодной камерой сжатия по сравнению с машинами с горячей камерой сжатия позволяют получить отливки более высокого качества, поскольку сжатый воздух не действует непосредственно на металл. При литье на машинах применяется более высокое давление, что позволяет производить отливки при пониженных температурах. Такие машины используются для отливки ответственных деталей из алюминиевых, медных, магниевых сплавов. Давление в камере сжатия компрессорных машин колеблется от 1,5 до 7 МПа, доходя в отдельных случаях до 100 МПа. В машинах с холодной камерой сжатия, где отливка тугоплавких сплавов производится при низких температурах, удельное давление имеет пределы 30–50 МПа, доходя в отдельных случаях до 150 МПа.

9.5. Литье по выплавляемым моделям

Этот способ литья основан на применении модели из легкоплавкого материала (парафина, стеарина и др.), изготовленной с высокой точностью, и специальных облицовочных, формовочных материалов,

которые в жидком состоянии наносят на модель. Облицовочный материал после высыхания и обжига формы при высоких температурах образует прочную корку, дающую точный отпечаток модели. В последующих операциях модель расплавляется и выливается из формы.

Часто пользуются следующим способом получения пресс-форм (рис. 9.6, а) для отливки модели из легкоплавких материалов. Изготовляют стальной или латунный эталон 6 детали с припуском на усадку заливаемого металла и на обработку заготовки. Эталон 6 устанавливают в стальную нижнюю обойму 5 до линии разъема в земле или цементе 1. На нижнюю обойму устанавливают верхнюю обойму 4, заливают ее сплавом Вуда 3 (Sn – 58%; Bi – 42%, с температурой плавления 135°C) и прессуют плунжером 2 в течение 20–30 мин. После этого в той же последовательности изготовляют пресс-форму для питателей.

Сборку полученных легкоплавких моделей в блок производят так: нагретым ножом (ланцетом) прикасаются к модели 7 и к питателю 8; места соприкосновения нагреваются и начинают плавиться; в этот момент прижимают модель к питателю нагретыми частями; при охлажде-

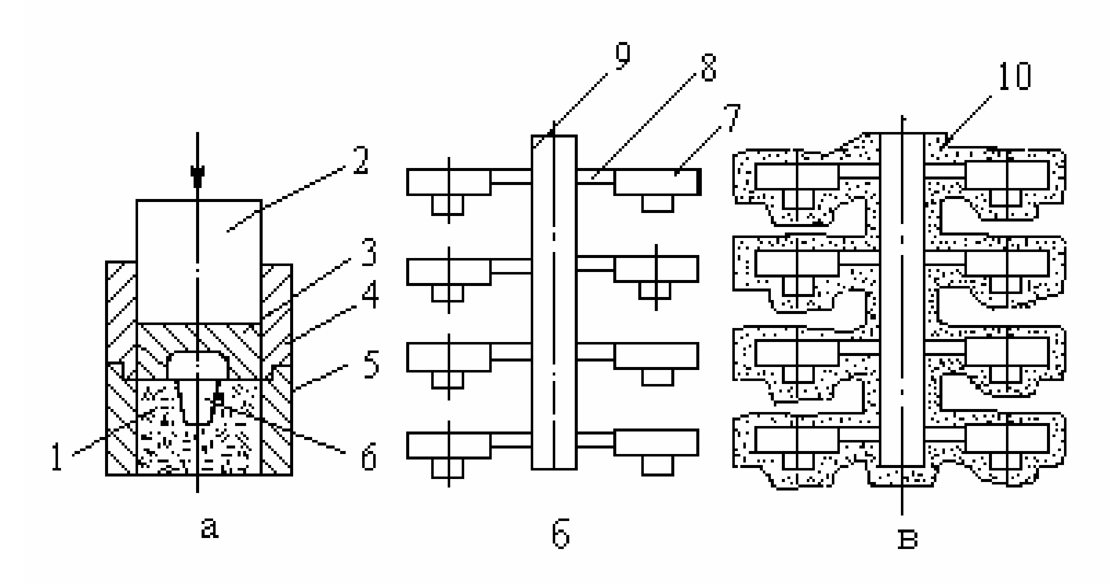


Рис. 9.6. Получение формы по выплавляемой модели:
1 – земля (цемент); 2 – плунжер; 3 – сплав Вуда; 4 – верхняя опока;
5 – нижняя опока; 6 – эталон; 7 – модели детали; 8 – питатель;
9 – стояк; 10 – форма

нии материала получается прочное соединение модели с питателем.

Далее модели с питателями собираются в блок (рис. 9.6, б). Блок опускают в ванну с силикатным клеем или опрыскивают из пульверизатора, а затем помещают в емкость с взвешенным пылевидным кварцем.

Под дно бака подводят сжатый воздух. На дне положен пористый материал (поролон, войлок и др.), чтобы поступающий под этот материал воздух проходил в бак по всей площади дна примерно с одинаковым давлением. На пористом материале сверху насыпан пылевидный кварц или другой специальный материал, перемешанный со связующим материалом (эластиком). Воздушная струя поднимает кварц таким образом, чтобы наступило динамическое равновесие частиц и воздушного потока. Песчинки оказываются взвешенными в воздухе, что позволяет легко погрузить в них блок моделей. Приклеиваясь к поверхности смазанного блока, частички образуют вокруг блока оболочку толщиной 1–1,5 мм. Поэтому опускание в ванну с клеем и бак с кварцем повторяют 2–4 раза для получения оболочки 3–4 мм.

Полученная форма (рис. 9.6, в) просушивается в течение 6 часов при комнатной температуре, затем блок опускается в ванну с температурой воды 85–90°С, легкоплавкая композиция через 5–10 минут плавится, выливается из формы и всплывает на поверхности ванны, где попадает в специальную емкость и отделяется от воды. Извлеченная из ванны форма сушится на воздухе, укладывается в металлическую опоку и уплотняется мелким песком, чтобы жидкий металл при заливке не прорвал тонкостенную форму. Опока с формой подается в печь для прокаливания при температуре 850–900°С, чтобы удалить влагу и остатки композиции, которые при заливке металла могут сгореть и образовать в отливке газовые раковины, а также повысить газопроницаемость огнеупорной оболочки. В горячую форму, извлеченную из печи, заливают жидкий металл. Залитые формы после 1,5–2 часов охлаждения поступают на выбивку. Блок после выбивки покрыт корочкой огнеупорной массы, снимающейся с наружных поверхностей вибраторами, а с внутренних – погружением блока в кипящий раствор щелочи или кислоты. Затем заготовки отделяют от ответвлений стояка блока на металлорежущих станках, абразивным кругом, газопламенной резкой, или в специальных установках. Для придания требуемых свойств и структуры, а также для снятия внутренних напряжений, заготовки подвергаются термообработке.

На рис. 9.7 показаны отливки, полученные по выплавляемым моделям. Сложная отливка (рис. 9.7, а) имеет несколько осей симметрии: три – по внутренним полостям, одну – по основанию. Использование латунной отливки (рис. 9.7, б) позволило избежать до 30 операций механической обработки. Отливка (рис. 9.7, в) заменила 20 отдельных элементов, соединяемых пайкой твердым припоем. Операции пайки требо-

вали дорогостоящих зажимных приспособлений, без которых невозможно было обеспечить необходимую точность расположения собираемых звеньев в узле.

При литье по выплавляемым моделям отливки не деформируются, так как металл заливается в горячие формы и изделия охлаждаются вместе с формой. Для рассматриваемого способа литья характерны значительные затраты на модели и формовочный материал. Необходимо применение специальных печей для плавки и оборудования для изготовления моделей. Однако это, как правило, окупается значительным сокращением механической обработки вследствие повышения точности отливки. Литье по выплавляемым моделям применяется в массовом и серийном производстве.

Точность отливок, изготовленных по выплавляемым моделям, достигает 10–12 квалитетов, а шероховатость поверхности находится в пределах от Rz 160 до Rz 10. Литьем по выплавляемым моделям можно получить мелкие и крупные детали весом от нескольких граммов до десятков килограммов.

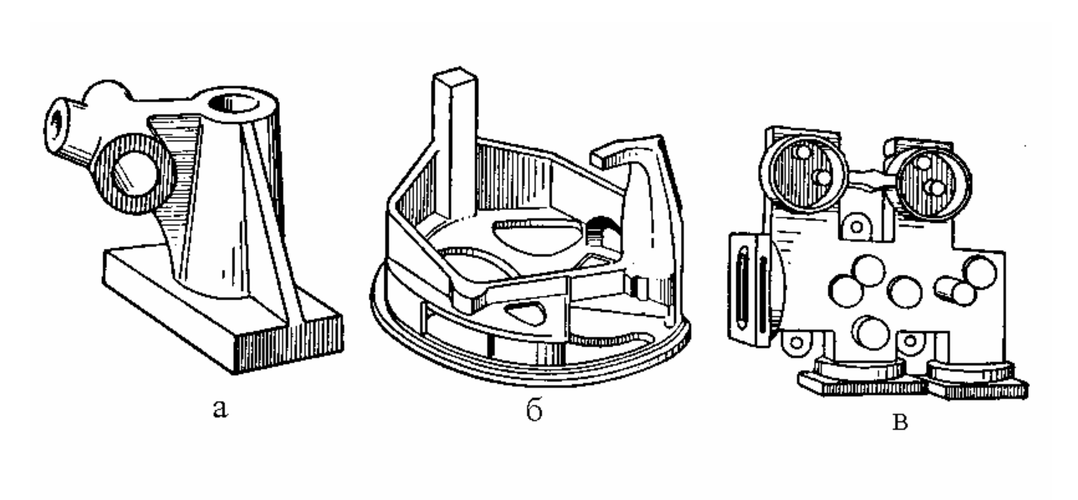


Рис. 9.7. Отливки, полученные по выплавляемым моделям

9.6. Литье в оболочковые формы

Литье в оболочковые формы является разновидностью литья в песчаные формы одноразового использования. Его целесообразно применять для изготовления крупных деталей, сравнительно простых по форме, при необходимости получения малой шероховатости поверхности и высокой точности размеров.

Литье в оболочковые формы имеет большие преимущества перед отливкой в песчаные формы. При литье этим способом снижается трудоемкость формовки и механической обработки, ускоряется процесс изготовления формы и литья, сокращается расход формовочных материалов, а также стоимость их транспортировки. Повышается плотность и механические свойства отливок, почти полностью устраняется брак (засорение, раковины). Процесс изготовления форм и стержней может быть механизирован.

Отличительной особенностью этого литья является процесс приготовления формы. Оболочковые формы выполняют из песка с малым содержанием глины и термореактивной смолы. Наиболее распространен состав из кварцевого песка и порошкообразного бакелита (пульвербакелита). Для изготовления формы одностороннюю металлическую плиту, нагретую до 220–260°С, с укрепленной на ней половиной модели смазывают эмульсией, чтобы к ней не приставала формовочная смесь. Затем модель и плиту обсыпают толстым слоем формовочной смеси, состоящей из мелкого кварцевого песка и термореактивной искусственной смолы. Под действием тепла плиты и модели, прилегающий к ним слой формовочной смеси плавится и затвердевает, образуя на модельной плите однородную песчано-смоляную оболочку. Неотвердевшая часть смеси удаляется; модельная плита с образовавшейся на ней оболочкой толщиной в 7–10 мм направляется в печь, где заканчивается отвердевание оболочки. Выдержка в печи продолжается 2–3 минуты при 250–300 °С.

Оболочковые формы спариваются и скрепляются зажимами или склеиваются. После заливки металла песчано-смоляная оболочковая форма легко разрушается, освобождая отлитые детали. Литье этого вида имеет точность в пределах 12–13-го квалитетов при шероховатости поверхности Rz = 80–10. Большинство операций процесса может быть автоматизировано.

Недостатки способа: стоимость деталей и заготовок, полученных литьем в оболочковые формы, по сравнению с литьем в песчаные формы примерно на 30% больше из-за высокой стоимости пульвербакелита; токсическое действие бакелитовой смолы на рабочих, требующее соблюдения ряда условий техники безопасности.

9.7. Центробежное литье

При центробежном литье форма заполняется металлом за счет действия центробежных сил, вызываемых ее вращением. Для этой цели

используются специальные машины, изготовленные с вертикальной, горизонтальной или наклонной осью вращения.

В приборостроении наиболее распространены машины с вертикальной осью вращения (рис. 9.8, а). На них отливают колеса, втулки и т.п. На машинах с горизонтальной осью вращения литейной формы (рис. 9.8, б) получают отливки, у которых длина значительно больше диаметра (трубы, гильзы, роторы электродвигателей и др.).

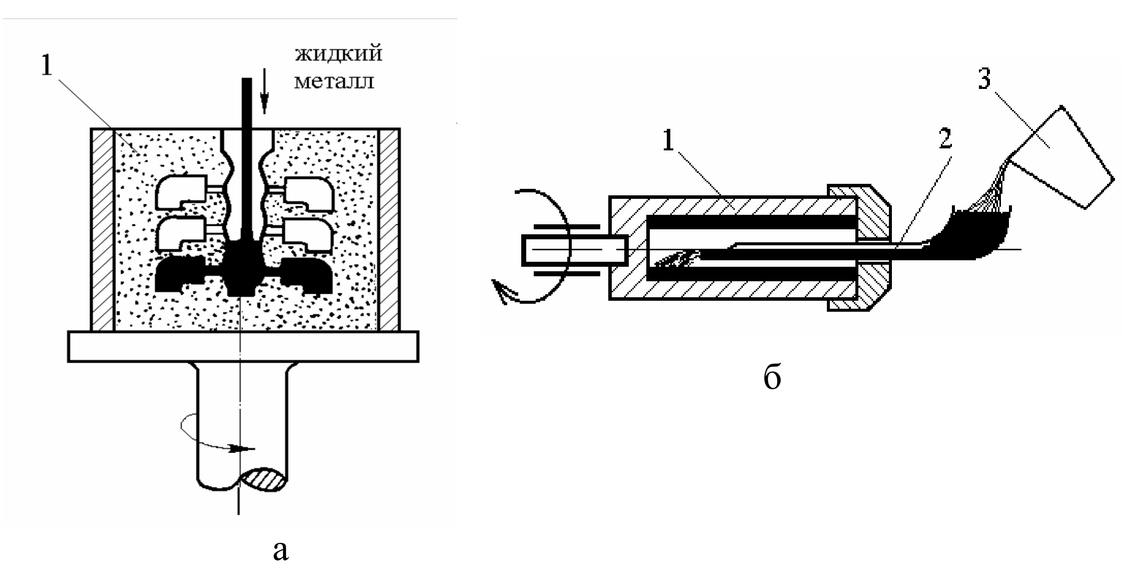


Рис. 9.8. Схемы машин для центробежного литья: а – с вертикальной осью вращения; б – с горизонтальной осью; 1 – литейная форма; 2 – заливочный желоб; 3 – ковш с жидким металлом

Целесообразность применения метода центробежного литья определяется его преимуществами: отсутствием литников или меньшим весом литниковой системы по сравнению с литьем в неподвижные формы; большей плотностью и повышенными механическими свойствами отливок, так как газы и шлак, как наиболее легкие, скапливаются в центральной части формы, т.е. в стояке; возможностью получения тонкостенных отливок и отливок из сплавов, обладающих низкой жидкотекучестью. Точность отливок достигает 0,06–0,1 мм. Способ центробежного литья особенно выгоден при серийном и массовом производстве, так как в этом случае оправдываются сравнительно большие первоначальные затраты на изготовление моделей, форм и т.п.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных этапов складывается процесс литья?
2. Перечислите известные методы литья и дайте краткую характеристику каждого метода.

Глава X. Процессы обработки давлением

10.1. Общие положения

Обработка давлением - это группа процессов переработки пластических металлов и других материалов в изделия (прокатка, волочение, ковка, штамповка, чеканка и др.), при реализации которых исходная заготовка в нагретом или холодном состоянии под действием давления пластически деформируется и приобретает новые заданные форму и размеры или заданные физические свойства поверхностного слоя. Как правило, после обработки давлением изменяются исходные физические свойства материалов заготовок. Например, при чеканке и правке металлических заготовок увеличивается их электрическое сопротивление, и повышается поверхностная твердость, а при вырубке пластин магнитопроводов ухудшаются их электромагнитные свойства. Поэтому технологические процессы изготовления штампованных деталей приборов содержат термические операции, назначение которых – формировать новые или восстанавливать исходные свойства материалов. Кроме термических операций, сопутствующих обработке давлением деталей приборов, производят операции, реализующие методы нанесения защитных покрытий, пайки, сварки и механической обработки. Необходимость в этих операциях обусловливается конкретными техническими требованиями к изготавливаемым деталям.

При изготовлении деталей приборов из всех процессов обработки давлением преимущественно используют методы холодной листовой и объемной штамповки. Листовой холодной штамповкой изготавливают до 85% деталей конструктивной базы радиоэлектронной аппаратуры (панели, платы, детали каркасов и корпусов, кожухи и др.) и широкую номенклатуру деталей, входящих в модули и узлы электронной и схемотехнической базы (выводы, корпуса и крышки микросхем и микросборок, детали магнитопроводов, панели разъемов и др.).

Широкое использование листовой штамповки в производстве деталей приборов объясняется такими ее достоинствами, как:

- возможность получения прочных и жестких, но легких деталей толщиной от 0,005 до 10 мм и габаритами от нескольких миллиметров до нескольких метров;
- достаточно высокая точность получаемых размеров деталей, обеспечивающая их взаимозаменяемость;
- высокая производительность процесса, обеспечивающая низкую стоимость изготовления; сравнительно небольшие отходы мате-

риала при правильном построении технологического процесса и раскрое листового материала;

- благоприятные условия для автоматизации и роботизации технологических операций.

В качестве исходных заготовок для листовой штамповки используют листовые материалы из стали и цветных деформируемых сплавов. Сложность получаемых штамповкой деталей и используемые методы накладывают определенные ограничения на механические характеристики материала исходной заготовки. Пример таких требований представлен табл. 10.1.

Таблица 10.1

Требования к механическим характеристикам стальных заготовок для листовой штамповки [14]

Сложность детали и используемые методы	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$ МПа	$\sigma_т / \sigma_в$	δ,%	ψ,%	HRB ед.
Сложная форма деталей	< 320	200	0,6	40	65	45
Сложная форма деталей и вытяжка за несколько переходов	300 – 600	200 – 350	0,6 – 0,65	20 – 38	55 – 65	50 –60
Простая форма деталей, получаемая без вытяжки	600	400	0,75	20	55	60

10.2. Подготовка материала к холодной штамповке

В приборостроении многие заготовки получают холодной штамповкой из листового, полосового и ленточного материала: стали, латуни, томпака, нейзильбера, гетинакса, органического стекла и др. Холодная штамповка позволяет получить детали и заготовки сложной формы 7–9-го квалитета и шероховатостью Rz10–Rz1,6, с высоким коэффициентом использования материала.

Оборудованием при штамповке являются прессы различной конструкции и давления, а в качестве инструмента на прессах применяют штампы.

Если материал для штампованных заготовок и деталей поступает на завод в виде листов, то выполняют следующие заготовительные операции: резка листов на полосы, правка полос, протирка и смазка их. Возможны три способа раскроя листа на полосы (рис. 10.1): продольный (а), поперечный (б) и комбинированный (в). Для наиболее рационального использования материала при раскрое листа необходимо:

1) полосу на листе расположить так, чтобы выход деталей из листа был максимальным;

2) предусматривать отрезку одной из сторон листа для получения прямоугольных полос;

3) учитывать допуски на ширину и длину листов, для чего при расчетах следует брать не номинальные, а наименьшие предельные размеры листа;

4) при равных коэффициентах использования материала резку производить по длине;

5) при раскрое листа для вырубки заготовок, подвергаемых в дальнейшем гибке, а также для деталей магнитопроводов учитывать направление проката или его магнитные и другие свойства.

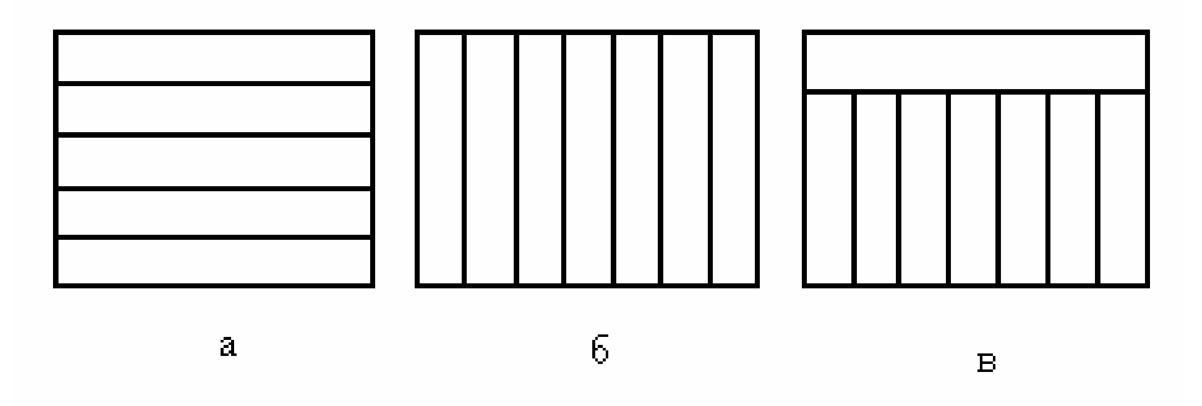


Рис. 10.1. Способы раскроя листа на полосы:
а – продольный; б – поперечный; в – комбинированный

Режут листы на полосы на гильотинных ножницах, а также дисковых ножницах с прямо поставленными ножами.

Необходимое количество материала для штампованных заготовок и деталей подсчитывают в такой последовательности. Определяется рациональный раскрой материала, т.е. взаимное расположение вырубаемых деталей или заготовок в полосе или в ленте. На основании выбран-

ного раскроя и принятой конструкции штампа определяют ширину полосы ленты или листа. Далее путем деления массы ленты или листа на количество деталей, получаемых из полосы листа или ленты, умножая на 1000, устанавливаем потребное количество материала, необходимое на 1000 деталей или заготовок. Рациональность раскроя определяется на основании подсчета коэффициента использования материала. Чем выше коэффициент, тем рациональнее раскрой. Под коэффициентом использования материала $\lambda=(fn)/F$ понимается отношение вырубленных из листа, ленты или полосы деталей к площади листа, ленты или полосы, где f – площадь одной детали; n – количество деталей или заготовок, получаемых из листа, ленты или полосы; F – площадь листа, ленты или полосы. Существуют следующие разновидности раскроев [1].

При однородном раскрое (рис 10.2, а) *ширина полосы или ленты*

$$B = d + 2K_1 + IT, \quad (10.1)$$

где B – ширина полосы, мм; d – диаметр детали, мм; K_1 – боковая перемычка, мм; IT – допуск на ширину полосы, мм;

шаг вырубки

$$t = d + K, \quad (10.2)$$

где K – перемычка между деталями, мм;

количество деталей

$$n = [L - (5...10)]/t, \quad (10.3)$$

где L – длина полосы или ленты (округление производится до целого числа), мм.

При двухрядном параллельном раскрое (рис. 10. 2, б)

ширина полосы

$$B = 2d + 3K_1 + IT; \quad (10.4)$$

количество деталей

$$n = 2\{[L - (5....10]/t\}. \quad (10.5)$$

При двухрядном раскрое в шахматном порядке (рис. 10.2, г)

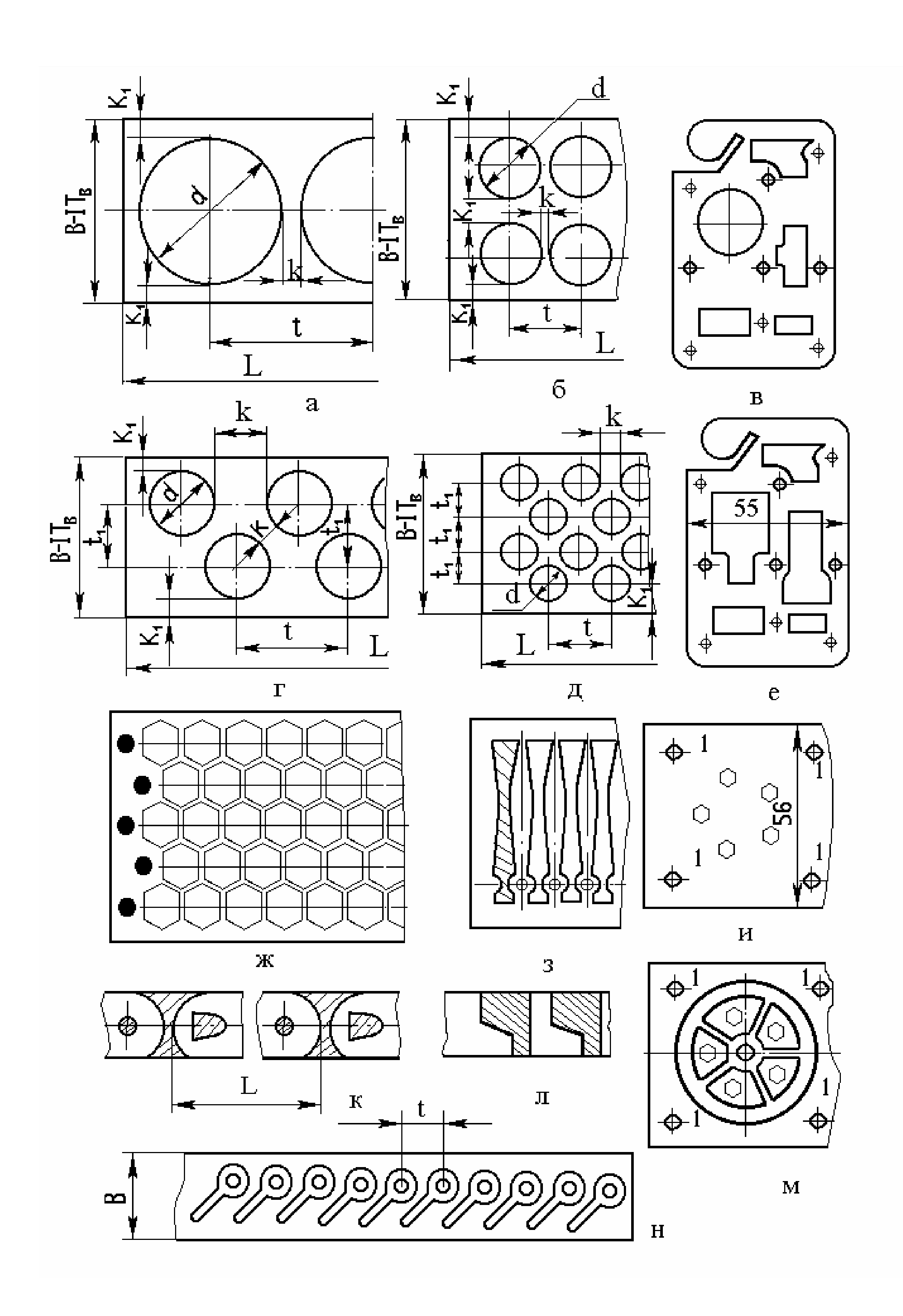


Рис. 10.2. Разновидности раскроя полосы (ленты)

ширина полосы

$$B = d + t_1 + 2K_1 + IT, \qquad (10.6)$$

где $t_1 = (\sqrt{3/2})\ t$ – боковой шаг, мм.

Количество деталей определяется так же, как и при двухрядном параллельном раскрое.

При четырехрядном раскрое в шахматном порядке (рис. 10.1, д)

ширина полосы

$$n = d + 3t_1 + 2K_1 + IT; \qquad (10.7)$$

количество деталей

$$n = 4\ \{[L - (5....10]/t\}. \qquad (10.8)$$

При многорядном раскрое в шахматном порядке *ширина полосы*

$$B = (m - 1)\ t_1 + 2K_1 + IT, \qquad (10.9)$$

где m – число рядов в ленте;

количество деталей

$$n = m\ \{[L - (5....10]/t\}. \qquad (10.10)$$

Применение многорядного раскроя в шахматном порядке повышает коэффициент использования материала. Пятирядный раскрой в шахматном порядке при вырубке заготовок гаек в штампах последовательного действия приведен на рис. 10.2, ж.

Детали, имеющие ширину отдельных элементов меньше толщины ленты, например стрелки, часто вырубаются методом выштамповки отходов. Сами детали остаются в ленте на тонких перемычках и отрезаются на следующей позиции штампа последовательного действия (рис. 10.2, з). Это приводит к уменьшению коэффициента использования материала, но значительно повышает стойкость штампа, что экономически оправдывает высокие затраты на материал. Раскрой ленты с минимальными отходами целесообразно применять для деталей типа заводных пружин (рис. 10.2, к). Ширина ленты принимается равной ширине штампуемой детали. Отходы на штамповку (заштрихованы) незначительны; при этом помимо повышения коэффициента использования

улучшаются эксплуатационные свойства, так как направление волокон проката располагается вдоль детали.

Пример безотходного раскроя (т.е. без перемычек) приведен на рис. 10.2, л. Вырубка детали производится через шаг. Такой раскрой дает высокий коэффициент использования и может быть применен для деталей, имеющих определенную форму, поэтому конструктору при проектировании деталей, получаемых холодной штамповкой, необходимо по возможности придавать детали такую конфигурацию, чтобы ее можно было штамповать без отходов или с минимальными отходами.

Некоторые детали, получаемые штамповкой, имеют смотровые окна или окна для облегчения массы детали, например, платинка (рис. 10.2, е). Смотровые окна 1 и 2 имеют форму неопределенной конфигурации, в результате чего коэффициент использования материала низкий. После пересмотра конструкции детали окна 1 и 2 (рис. 10.2, в) стали иметь форму заготовки скобочного колеса и ручки ключа, что дало возможность повысить коэффициент использования материала на 0,12.

При штамповке заготовок колес со спицами очень много металла уходит в отходы. Для повышения коэффициента использования материала можно из отходов секторов, образующих спицы, штамповать какие – либо другие детали, вписывающиеся в периметр отходов. Например, при вырубке заготовки колеса маятника часов, толщина которого имеет одинаковые размеры с гайкой крепления, сначала из полосы вырубают пять заготовок гаек и два отверстия (рис. 10.2, и), затем – заготовку колеса со спицами и центральным отверстием, при этом базирование производится на два отверстия 1 (рис. 10.2, м). В ряде случаев, когда толщина деталей, получаемых из отходов, имеет меньшие размеры, чем основная деталь, после вырубки основной детали производят прокатку полос до требуемого размера по толщине, а затем вырубают заготовки, используя отходы полосы. Таким образом, можно повысить коэффициент использования материала на 0,2–0,3.

Пример раскроя с угловым наклоном приведен на рис. 10.2, н.

10.3. Операции холодной штамповки

Операции холодной штамповки делят на три основные группы:

1) разделительные операции (с местным разрушением материала), к числу которых относятся: отрезка, пробивка, вырезка, надрезка, разрезка, обрезка, зачистка и просечка;

2) формоизменяющие операции методом пластической деформации, когда плоские или пространственные заготовки превращаются в

требуемую деталь (сюда относятся, гибка, вытяжка, формовка, объемная штамповка и др.);

3) штамповочно-сборочные операции, при которых несколько деталей соединяют в сборочные единицы на прессах или специальных станках в приспособлениях.

Классификация основных процессов и операций холодной штамповки приводятся на рис. 10. 3.

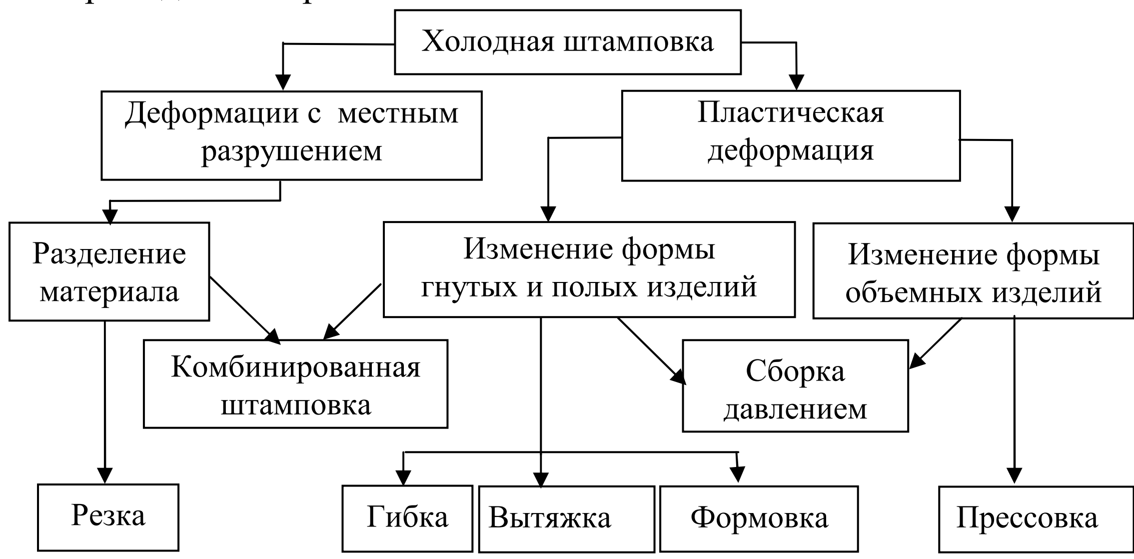


Рис. 10.3. Классификация основных процессов и операций холодной штамповки

В массовом и крупносерийном производстве некоторые штамповочные операции часто объединяют в одну, например, вырубка и вытяжка, вырубка и зачистка, отрезка и гибка, вырубка и пробивка и т.д. Это требует инструментов более сложной конструкции – комбинированных штампов или штампов последовательного действия. Рассмотрим некоторые операции холодной штамповки более подробно.

Вырубка и пробивка. Вырубка по контуру и пробивка отверстий являются наиболее распространенными штамповочными операциями, производящимися как раздельно, так и совместно. При вырубке и пробивке в штампах деталей толщиной до 0,5 мм обеспечивается точность до 8-го квалитета и шероховатость Rz20–Rz10 [10].

С увеличением толщины пробиваемого материала точность изготовления снижается на один квалитет. Существенное влияние на шероховатость пробиваемого отверстия или вырубаемого контура изделия оказывает состояние режущих кромок и шероховатость пуансона и матрицы, величина зазора между пуансоном и матрицей, марка материала изделия.

Сила вырубки и пробивки

$$P = lS\,\tau_{ср}, \qquad (10.11)$$

где l – периметр вырезки, мм; S – толщина материала детали, мм; $\tau_{ср}$ – сопротивление материала срезу, МПа.

Требуемое усилие пресса в приборостроении принимают на 30% больше расчетного усилия: $P_{пр} = 1{,}3P$.

Зачистка по контуру. В том случае, когда детали, получаемые холодной штамповкой, должны иметь Rz3,2–Rz1,6 и 7–8 квалитет, после вырубки и пробивки производят операцию зачистки. Существуют три схемы выполнения зачистки:

1) зачистка со снятием припуска (рис. 10.4, а), при которой матрица имеет размеры зачищенной детали, а пуансон изготовляется меньше матрицы на величину зазора, не превышающего 0,01 мм;

2) зачистка пуансоном большего диаметра (рис.10.4, б), причем матрица имеет размеры зачищенной детали, а пуансон несколько полнее матрицы и имеет размеры заготовки, поступающей на зачистку. Пуансон не должен доходить до поверхности матрицы на 0,2–0,3 мм, а заготовка должна проталкиваться через матрицу следующей зачищаемой заготовкой;

3) зачистка обжимкой в конусной матрице (рис. 10.4, в), производящаяся проталкиванием вырубленной детали через матрицу с закругленными кромками. Таким образом, зачищаются тонкие стальные детали, при этом шероховатость поверхности после зачистки достигает Rz0,6–Rz0,8. Для зачистки заготовок, полученных вырубкой, предусматривается припуск, величина которого зависит от толщины и марки материала.

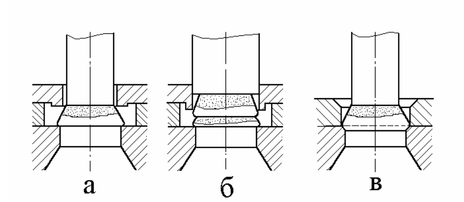


Рис.10.4. Схема зачистки по контуру

В целях повышения производительности для небольших заготовок простой конфигурации вырубку и зачистку объединяют в одну операцию и производят в специальных штампах с двумя матрицами, установленными одна над другой. В верхней матрице происходит вырубка, после чего заготовка последующими вырубленными заготовками проталкивается через зачистную матрицу, где снимается припуск на зачистку. Между вырубной и зачистной матрицами должен быть предусмотрен зазор для выхода стружки, получающейся при зачистке. В зазоре помещены ножи для разрезки кольцевой стружки.

Усилие, необходимое для зачистки,

$$P = 1{,}5\ l\ a\tau_{ср}, \qquad (10.11)$$

где l – периметр заготовки, мм; a – припуск на сторону, мм; $\tau_{ср}$ – сопротивление срезу, МПа.

Калибровка. В приборостроении калибровка – это получение отверстий с точными диаметральными и межцентровыми размерами и зачистка их с меньшей шероховатостью поверхности после сверления или пробивки. Калибровка производится двумя способами: со снятием стружки, без снятия стружки. Особенности операций калибровки отверстий со снятием стружки - отсутствие сопряженных режущих кромок, так как матрицей служит плита с углублением для выхода стружки, диаметр D которого в полтора раза больше калибруемого отверстия d (рис.10.5). Припуск на калибровку отверстий со снятием стружки – 0,1–0,2 мм в зависимости от толщины заготовки и погрешности предварительной обработки. Диаметр зачистного пуансона $d_{п} = d_{пд} + K$, где $d_{пд}$ – наибольший предельный размер отверстия детали, мм; K – коэффициент, учитывающий упругие деформации (для алюминия K = 0,005–0,010 мм, для латуни K = 0,007–0,012 мм, для мягкой стали K = 0,008–0,015 мм).

Калибровку отверстий без снятия стружки выполняют путем уплотнения стенок отверстий при помощи шарика или пуансона, имеющего сечение, соответствующее сечению калибруемого отверстия, но без режущих кромок. Припуск на калибровку без снятия стружки принимается в два раза меньшим, чем со снятием стружки.

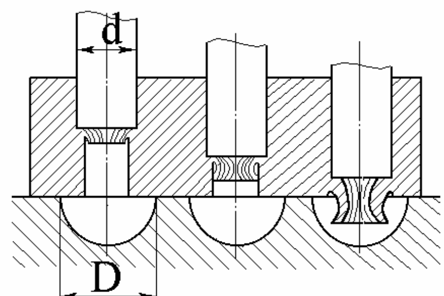


Рис. 10.5. Схема калибровки отверстий

Гибка. Некоторые детали приборов изготавливают путем гибки на прессах в штампах из полосового материала, проволоки, сортового проката или из предварительно вырубленных штампованных заготовок. Иногда вырубку заготовок и гибку их совмещают в одну операцию. При конструировании для более точного изготовления деталей гибкой необходимо исключить изгибы сторон под углом 90°, заменяя их на меньшие; радиус изгиба делать как можно большим, так как при слишком малом радиусе неизбежен разрыв наружных волокон материала. Допустимая минимальная величина радиуса изгиба зависит от механических свойств материала, его толщины, направления изгиба относительно направления прокатки и других факторов.

Минимальный внутренний радиус гиба [1] $r = KS$, где К – коэффициент, значения которого приведены в табл. 10.2; S – толщина изгибаемой детали, мм.

Длина заготовки (рис.10.6) для детали, изготовляемой гибкой, равна сумме прямолинейных участков и длин дуг, подсчитанных по нейтральной линии в пределах закругления. Положение нейтральной линии зависит от толщины материала и радиуса гиба $R = r + nS$, где R – радиус нейтральной линии, мм; r – радиус закругления детали, мм; S – толщина материала, мм; n – коэффициент, зависящий от отношения r/S:

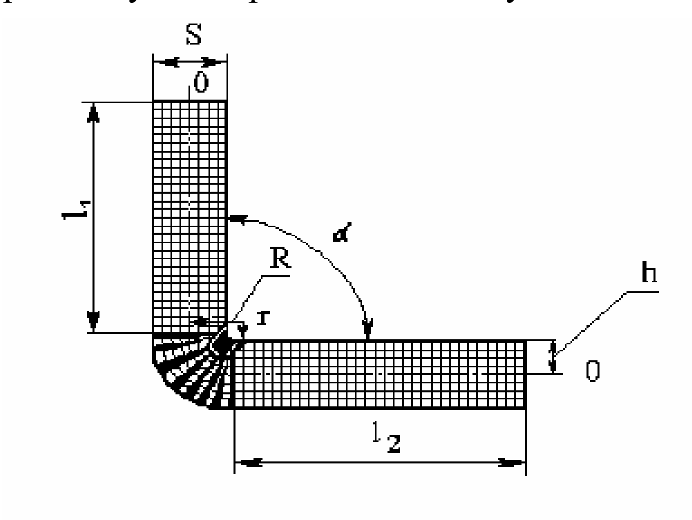


Рис. 10.6. Схема гибки

r/S	0,10	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	5,0
n	0,18	0,26	0,33	0,39	0,44	0,47	0,5

Для деталей с одним углом изгиба α длина заготовки

$$L = l_1 + l_2 + (\pi\alpha/180)R. \qquad (10.13)$$

В процессе гибки имеет место пружинение, вызывающее изменение формы детали. Углом пружинения называют разницу между действительным углом и углом, полученным на заготовке после гибки. Величина угла пружинения зависит от формы изгибаемой детали, механических свойств изгибаемого материала (чем тверже материал, тем больше угол пружинения), радиуса гибки (чем больше радиус гибки, тем больше угол пружинения), толщины материала (чем тоньше материал, тем больше угол пружинения) и способа гибки (при свободной гибке угол пружинения больше, чем при гибке с подчеканкой угла).

Таблица 10. 2

Значения коэффициента К для различных материалов

Материал	Коэффициент К при гибке заготовок			
	отожженных		наклепанных	
	линия гиба поперек волокна	линия гиба вдоль волокна	линия гиба поперек волокна	линия гиба вдоль волокна
Алюминий	0	0,2	0,3	0,8
Медь	0	0,2	1,0	2,0
Латунь	0	0,2	0,4	0,8
Сталь 05–10, Ст1, Ст2	–	0,4	0,4	0,8
Сталь 15–20, Ст3	0,1	0,5	0,5	1,0
Сталь 25–30, Ст4	0.2	0.6	0.6	1,2
Сталь 35–40, Ст5	0,3	0,8	0,8	1,5
Сталь 45 –50, Ст6	0,5	1,0	1,0	1,7
Сталь 55 – 60, Ст7	0,7	1,3	1,3	2,0
Дюралюминий мягкий	1,0	1,5	1,5	2,5
Дюралюминий закаленный	1,2	3,0	3,0	4,0

Примечание. При гибке заготовок с заусенцами радиусы следует увеличить в 1,5 – 1,8 раза.

Вытяжка. Вытяжкой называют штамповочную операцию, при которой из листового материала получается тонкостенная деталь или заготовка (корпуса, крышки, звонки, ободки и другие детали приборов). Если в процессе вытяжки происходит уменьшение толщины материала, то такую операцию называют вытяжкой с утонением. При вытяжке без утонения, применяющейся в приборостроении чаще всего, превращение плоской заготовки в полую деталь или последующее изменение ее формы происходит без изменения толщины материала.

Вытяжка (рис. 10. 7) без утонения производится с прижимом (а) вытягиваемой заготовки и без прижима (б). При использовании прижимных устройств (прижимного кольца) складки на боковой поверхности вытягиваемой заготовки не образуются. Если на первой операции вытяжки отношение толщины материала плоской заготовки к ее диаметру меньше 0,015, то вытяжку следует производить с прижимом, если

больше 0,015, – то без прижима. При вытяжке без прижима зазор между пуансоном и матрицей должен быть равномерным по всему периметру и равняться толщине вытягиваемого материала. Небольшой зазор между пуансоном исключает образование складок, так как лишний материал течет вверх.

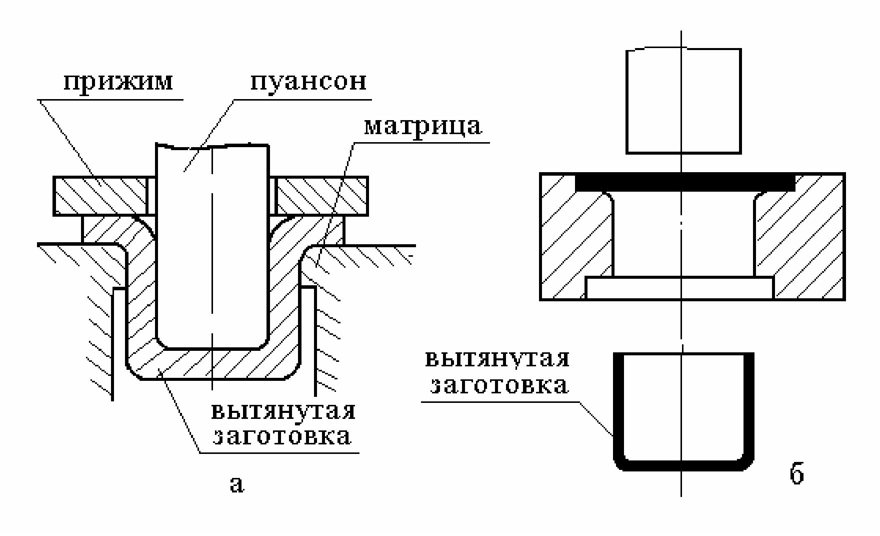


Рис. 10.7. Схема вытяжки

При проектировании технологических процессов на деталях, получаемых вытяжкой, прежде всего, приходится определять размеры плоской заготовки для вытяжки и число операций при вытяжке, так, как не каждую заготовку можно получить за одну операцию. При определении размера плоской заготовки необходимо привести чертеж детали к такому виду, какой она должна иметь после последней операции вытяжки, и установить линию расчетного контура. При этом следует пользоваться следующими указаниями:

1) если высота детали меньше половины ее диаметра, а толщина стенки менее 1 мм, то можно пользоваться непосредственно чертежными размерами (внутренними и наружными);

2) если высота вытягиваемой детали больше половины ее диаметра, а толщина стенок менее 1 мм, то линия расчетного контура должна соответствовать средней линии детали;

3) если радиусы менее 0,2–0,3 толщины детали при условии, что последняя не более 2 мм, то радиусы в расчет не принимаются;

4) если размер детали на чертеже указан с допуском, то расчет ведется по номинальным размерам;

5) получение точных размеров вытянутых деталей по высоте достигается путем обрезки, для чего должен быть предусмотрен припуск.

Размеры плоской заготовки при вытяжке определяются методами: равенства объемов вытянутой детали и плоской заготовки; равенства поверхностей и др.

Метод равенства объемов. Этот метод применяют при вытяжке деталей с утонением стенок.

Диаметр плоской заготовки D = $\sqrt{4V\ /\ (3{,}14S)}$, где V – объем вытягиваемой детали с учетом припуска на обрезку, мм^3; S – толщина материала, мм.

Методом равенства поверхностей. Этот метод используется при вытяжке деталей без утонения стенок, при этом

D = $\sqrt{4(F1 + F2 + \ldots Fn)\ /\ 3{,}14}$, где F_1, F_2... Fn - площади отдельных поверхностей детали.

После вытяжки края изделия получаются неровными, особенно при глубокой вытяжке. Эти неровные края в дальнейшем обрезаются. При расчете плоской заготовки необходимо учитывать припуск на обрезку изделия. Величина припуска для изделия высотой до 50 мм может быть принята в пределах 7–10 % от высоты изделия, а для изделия высотой 50–150 мм – в пределах 6–4 %.

Превратить плоскую заготовку в полую деталь не всегда возможно за одну операцию. В некоторых случаях для этого требуется несколько последовательных операций вытяжки (рис. 10.8).

Число операций, необходимое для получения глубокого стакана вытяжкой без утонения, определяют, исходя из коэффициента вытяжки m (табл. 10.3). Последний характеризует максимально возможное уменьшение диаметра заготовки или полуфабриката за одну операцию при условии отсутствия разрывов материала. Значения коэффициента вытяжки зависят от материала и толщины вытягиваемого изделия.

Зная коэффициент вытяжки, можно найти минимально возможный диаметр цилиндра, который может быть получен за одну операцию. Если суммарный коэффициент вытяжки меньше табличного m_1 для операции вытяжки, то вытянуть деталь за одну операцию невозможно. В этом случае необходимо назначить такое количество вытяжных операций (рис. 10.8), при котором произведение коэффициентов вытяжки по отдельным операциям будет равно суммарному коэффициенту вытяжки, т.е. $m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \ldots m_{n-1} \cdot m_n = m$, где $m_1 = d_1 / D$ –- коэффициент вытяжки первой операции; $m_n = d_n / d_{n-1}$ – коэффициент вытяжки n-й операции.

Таблица 10.3

Минимально допустимый коэффициент вытяжки на первой операции [1]

Материал	Коэффициент вытяжки	
	m_1	$m_2 \ldots m_n$
Сталь декопированная	0,54 – 0,58	0,75 – 0,78
Сталь Х13	0,56 – 0.58	0,75 – 0,78
Латунь Л62	0,52 – 054	0,70 – 0,72
Латунь Л68	0,50 – 0,52	0,68 – 0,72
Алюминий АМЦ	0,52 – 0,55	0,70 – 0,75
Дюралюмин Д16	0,52 –0,58	0,75 – 0,8

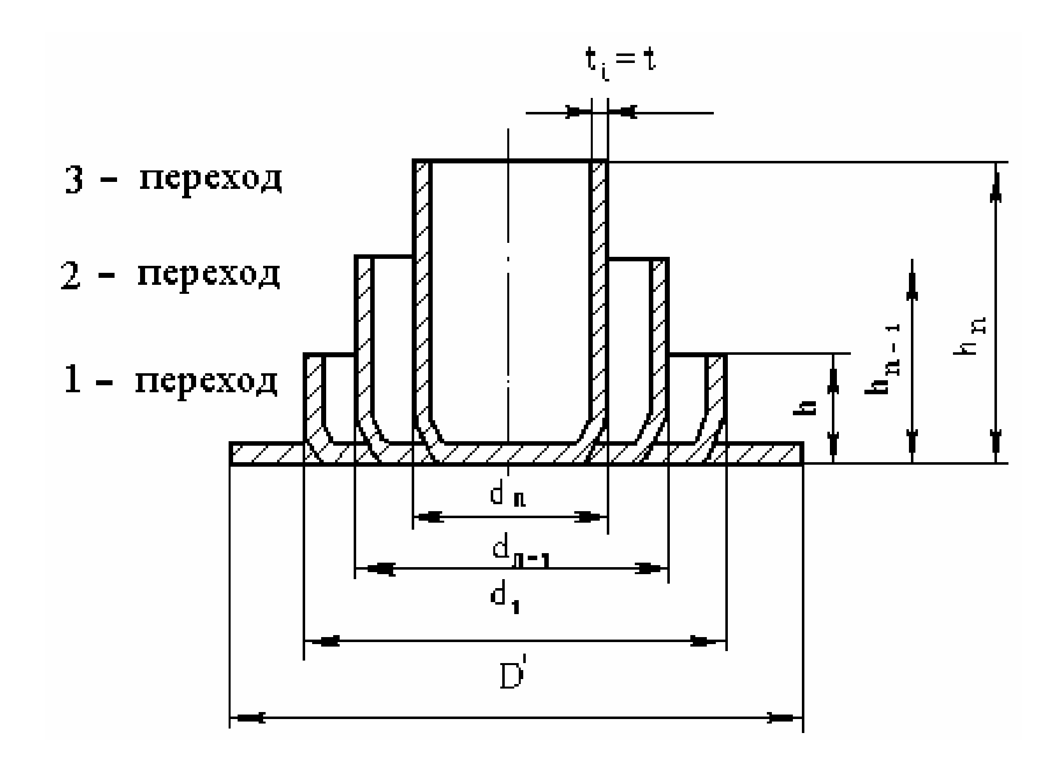


Рис. 10.8. Последовательность вытяжки цилиндрических деталей

Усилие вытяжки без прижима цилиндрических деталей с достаточной точностью может быть подсчитано по следующим формулам:

для первой операции вытяжки

$$P_1 = 0{,}8\,\pi\, d_1\, s\, \sigma_в; \qquad (10.\,14)$$

для второй и последующих операций вытяжки

$$P_2 = 0{,}9\,\pi\, d_2\, s\, \sigma_в, \qquad (10.\,15)$$

где d_1 и d_2 – диаметры вытянутых деталей на первой и второй операциях, м; s – толщина вытягиваемой детали, м; $\sigma_в$ – предел прочности на растяжение, МПа.

Когда при вытяжке применяется прижим заготовки, то требуемое усилие пресса определяется по формуле $P_п = P + Q$, где P – усилие вытяжки, Н; Q = Fq – усилие прижима, Н; F – площадь прижима в начальный момент вытяжки, $м^2$; q – удельное давление прижимного кольца, МПа (для стали q = 2–3 МПа, для латуни q = 15–20 МПа).

Чтобы в процессе вытяжки не было разрушения материала, на пуансонах и матрицах необходимо округлять острые кромки (табл.10.4).

Радиус закругления пуансона следует брать от 0,7 до 0,9 от радиуса закругления матрицы, но не менее 2–2,5 толщины материала. Для уменьшения трения между материалом и рабочими частями вытяжного штампа, уменьшения силы вытяжки и исключения трещин применяют различные типы смазки.

Материал для вытяжки детали должен быть ровным и гладким, без рисок и следов коррозии, так как в местах, где имеются риски и ржавчина, происходит разрушение заготовок при вытяжке. Если на поверхности материала имеется коррозия, то ее удаляют травлением с последующей промывкой.

В процессе вытяжки происходит нагартовка материала (наклеп) и потеря им пластичности, что приводит к обрывам. Для восстановления пластических свойств металла и возможности проведения последующих операций применяют отжиг.

Таблица 10.4

Радиусы закруглений для вытяжных матриц

Материал детали	Радиусы закруглений для вытяжных матриц при толщине материала	
	до 3 мм	более 3 мм
Сталь 08 - 10	(6 – 10)S	(4 – 6)S
Латунь, медь, томпак	(5 – 8)S	(3 – 5)S
Алюминий	(4 – 7)S	(3 – 5)S

Примечание. Большие значения радиусов берутся для первой вытяжки и для тонкого материала.

Выдавливание. Выдавливанием называют штамповочную операцию, при которой из плоских заготовок получают пустотелые детали с толщиной стенки от 0,1 до 1,5 мм и диаметром от 8 до 100 мм. В ос-

нове выдавливания лежит способность материала заготовки, помещенного в полость матрицы, под действием удара пуансона течь в зазор между пуансоном и матрицей или выдавливаться в отверстие матрицы, принимая необходимую форму. Выдавливание полых деталей по сравнению с обычной вытяжкой и вытяжкой с утонением позволяет снизить общую трудоемкость изготовления в 3–4 раза, затраты на штампы – в 2–3 раза и получить значительную экономию материала за счет высокого коэффициента использования материала. В настоящее время в промышленных масштабах освоено выдавливание деталей из алюминия, меди, латуни, цинка, сплавов этих металлов и сталей различных марок. Осваивается производство изделий из титана и молибдена.

Различают четыре способа изготовления деталей выдавливанием (рис. 10.9).

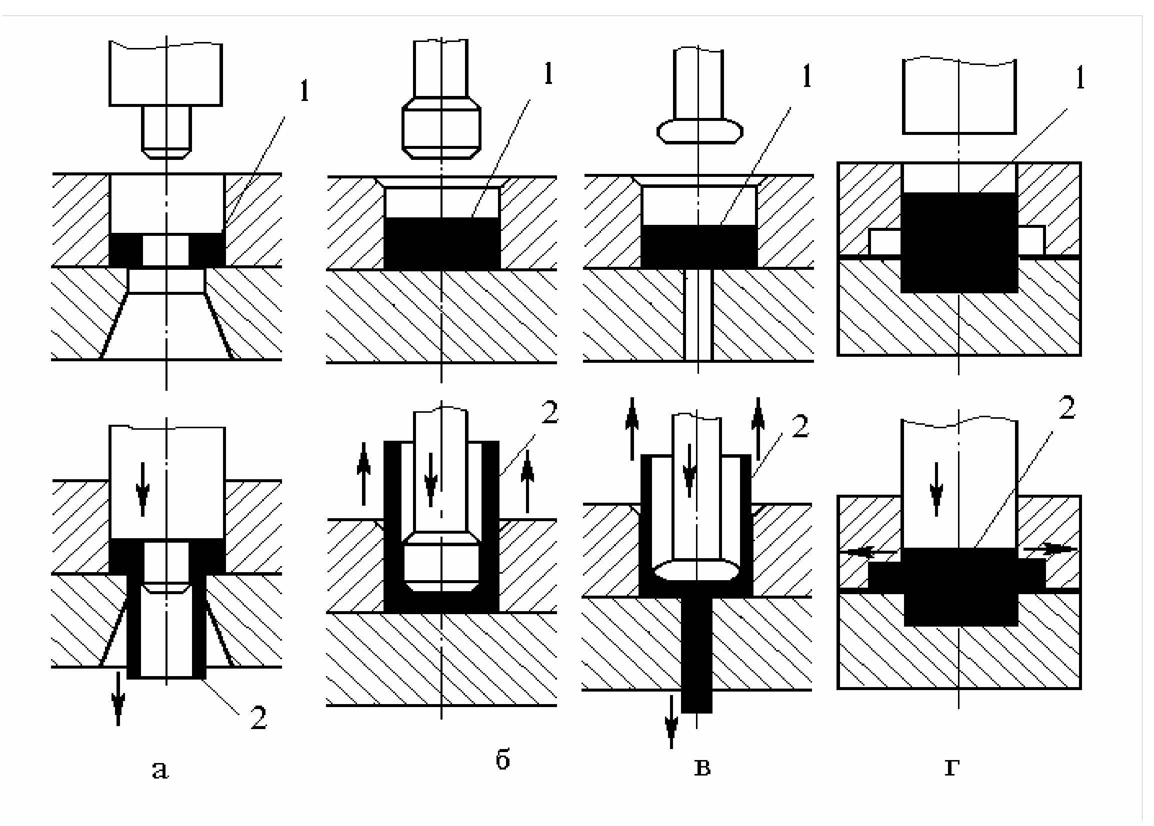


Рис. 10.9. Способы выдавливания: а – прямой; б – обратный; в – комбинированный; г – с боковым истечением металла; 1 – заготовка; 2 – изделие

Прямой способ. Этот способ характеризуется течением материала в направлении движения пуансона. Заготовку помещают в полость матрицы, и металл выдавливают пуансоном в зазор между головкой пуансона и отверстием в матрице.

Обратный способ. Этот способ назван так потому, что течение металла происходит в направлении, обратном движению пуансона; штампуемая деталь помещается в полость матрицы, и пуансон внедряется в нее. Металл заготовки выдавливается в зазор между пуансоном и матрицей, образуя стенку полой детали. Толщина дна детали определяется ходом пресса и не зависит от толщины стенки. Отштампованная заготовка остается в пуансоне и снимается с него съемником. Преимуществами этого способа по сравнению с прямым способом являются простота конструкции инструмента и легкость съема изделия после штамповки.

Комбинированный способ. Этот способ ударного выдавливания характеризуется тем, что течение металла происходит одновременно и в направлении движения пуансона, и в обратном направлении.

Выдавливание с боковым истечением. Металл под давлением перемещается в направлении, перпендикулярном оси пуансона, образуя соответствующие элементы детали.

Выбор того или иного способа выдавливания зависит от заданной формы детали. При полых деталях с малым диаметром и большой высотой целесообразнее применять прямой способ, при котором можно работать с коротким пуансоном; при большом диаметре и малой высоте детали – обратный способ. Комбинированный способ следует применять при изготовлении деталей ступенчатой формы, при этом часть большего диаметра получается обратным способом, а часть, имеющая меньший диаметр, – прямым.

Точность изготовления при выдавливании по наружному диаметру и толщине может быть в пределах от ± 0,03 до ± 0,08 мм, а по длине ± 3,0 мм. Используются плоские заготовки, имеющие в сечении форму детали. Заготовки получают вырубкой с последующей зачисткой или чистовой вырубкой в штампах. Толщина материала заготовки $S = V/F$, где V – объем детали с учетом припуска на обрезку; F – площадь заготовки.

Охватывающие размеры заготовки должны быть на 0,1–0,2 мм больше чем у детали, а охватываемые размеры заготовки – меньше на 0,1–0,5 мм, чем соответствующие размеры детали. Величина припуска на обрезку заготовок (мм), полученных выдавливанием:

$$\delta_h = (0{,}5 - 0{,}8)\, h^{1/2}, \qquad (10.16)$$

где h – высота детали по чертежу, мм; коэффициент 0,5 принимается для деталей высотой до 100 мм; 0,8 – свыше 100 м.

При изготовлении деталей выдавливанием следует применять смазочные материалы, резко уменьшающие усилие выдавливания, улучшающие чистоту поверхности и исключающие появление задиров на поверхности. Требуемое давление пресса при выдавливании $P = Fq$, где F – площадь сечения заготовки, мм^2; q – удельное давление, МПа.

Обжимка, чеканка и клеймение. В приборостроении некоторые детали или их элементы получают обжимкой, чеканкой или клеймением.

Обжимку применяют для притупления острых углов или получения фасок. Эту операцию выполняют в начальной стадии обработки на прессах в специальных штампах путем местного смятия материала заготовки с последующим снятием наплывов по контуру.

Чеканка служит, например, для окончательной обработки заготовок корпусов наручных часов, полученных горячей штамповкой, или для получения рельефного рисунка и знаков на деталях внешнего оформления. Чеканка производится в специальных штампах на шарнирно-чеканочных или гидравлических прессах. При помощи чеканки можно достичь высокой точности – порядка $\pm 0{,}02$ мм при толщине 0,5 мм и более.

Клеймение используют для получения на поверхности деталей порядковых номеров изделий, марки завода-изготовителя, шкалы и других надписей, предусмотренных конструктивным чертежом изделия. Для клеймения номеров применяют специальные нумераторы с автоматическим переключением последней цифры при каждом двойном ходе ползуна пресса. Марку завода-изготовителя, шкалы и другие постоянные знаки и надписи производят на специальных штампах или совмещают с какой-либо другой операцией и выполняют на комбинированных штампах.

10.4. Бесштамповая обработка давлением

Бесштамповая обработка давлением основана на пластическом деформировании металла, в процессе которого заготовке придаются требуемые форма и размеры. В поверхностном слое металла создаются упрочнение (наклеп) и значительные напряжения сжатия, способствующие повышению механических свойств металла.

Обработка давлением имеет существенные преимущества по сравнению с резанием металлов:

- высокое качество поверхности достигается при высокой производительности;

• поверхностные слои обрабатываемого металла не насыщаются абразивными зернами, как при абразивной обработке;

• для изготовления инструментов не требуются материалы, содержащие дорогие дефицитные металлы (вольфрам, титан, кобальт и др.);

• процесс стабилен, так как мало изменяется состояние рабочих поверхностей инструмента; это создает хорошие предпосылки для механизации и автоматизации.

Методы холодной обработки давлением по назначению могут быть разделены на две основные группы: формообразование деталей; улучшение физико-механических свойств (методы упрочняющей технологии). В табл. 10.5. приведены способы бесштамповой обработки давлением, применяемые в приборостроении. Анализ данных табл. 10.5. свидетельствует, во-первых, о высоких качественных показателях различных способов обработки давлением и, во-вторых, об их универсальности. Их можно использовать для обработки самых разнообразных деталей приборов.

На рис.10.10 показаны некоторые детали приборов, получаемые различными способами бесштамповой обработки давлением: втулки 1 с точными отверстиями; зубчатые колеса 2 с накатанным зубом; резьбовые детали 3 (винт, шуруп и резьбовая шпилька с накатанной резьбой); профильные детали 4, прокатанные между роликами; ступенчатая трубка 5 и штырь штепсельного разъема 6, обработанные редуцированием; конические штифты 7 и цапфы 8, прокатанные между роликами; ламели 9, упрочненные накатыванием роликом.

В последние десятилетия область бесштамповой обработки давлением заметно расширилась. В серийном производстве стали чаще применять штамповку эластичной и жидкостной средами, а также импульсные методы обработки: магнитно-импульсное формование с использованием энергии электромагнитного поля, электрогидравлическую импульсную штамповку с использованием энергии гидравлического удара, возбуждаемого электрическим разрядом, штамповку взрывом (в основном для крупных деталей) и др.

Использование в качестве рабочего тела резины или жидкости позволяет получить пространственные детали незамкнутого и замкнутого контура практически любой конфигурации. В частности, таким способом может быть осуществлено формование упругих чувствительных элементов – мембран и сильфонов. При обработке взрывом скорости деформирования заготовок в десятки и сотни раз превышают скорость деформирования при обычной штамповке.

Исследование высокоскоростной бесштамповой обработки металлов показали, что с увеличением скорости деформирования повышаются механические характеристики металлов: предел прочности, предел текучести и др. При этом заметное повышение пределов прочности металла регистрируется уже при скорости деформирования 60–70 м/с.

Таблица 10.5

Способы бесштамповой обработки давлением

Способ обработки	Обрабатываемые детали	Схема обработки	Повышение микротвердости, % к исходной	Глубина упрчнённого поверхностного слоя, мкм
1	2	3	4	5
Наружные цилиндрические поверхности				
Прокатывание между роликами	Конические цапфы, штифты		20...40	10...100
Редуцирование	Сплошные и трубчатые детали		20...50	–
Накатывание роликом	Оси, валы		10...40	–

Продолжение табл. 10.5

1	2	3	4	5
Накатывание пружинящим шариком	Оси, валы		20...50	200...300
Дробеструйная обработка	Оси, валы, плоские и профильные детали		–	150..200
Внутренние цилиндрические поверхности				
Протягивание цельными и регулируемыми выглаживающими протяжками	Детали типа втулок		20...40	–
Прошивание цельными прошивками	Различные детали с отверстиями		20...40	
Прошивание наборными из твердосплавных колец прошивками	Различные детали с отверстиями		20...40	–

Продолжение табл.10.5

1	2	3	4	5
Плоские поверхности				
Накатывание пружинящим шариком: на строгальном станке	Детали с плоскими поверхностями		20...50	–
Накатывание роликом на строгальном станке	То же		–	200...300
Накатывание роликом (или шариком) на токарном станке	То же		–	–
Профильные поверхности				
Накатывание резьбы плоскими плашками	Резьбовые детали		20...40	300...1700

Продолжение табл.10.5

1	2	3	4	5
Накатывание резьбы роликами	Резьбовые детали		–	–
Накатывание	Цилиндрические прямозубые и шевронные зубчатые колеса		20...30	–
Калибровка	Цилиндрические зубчатые колеса		–	–
Прокатывание	Прутки различных профилей		10...30	–
Волочение	Прутки различных профилей		10...30	–

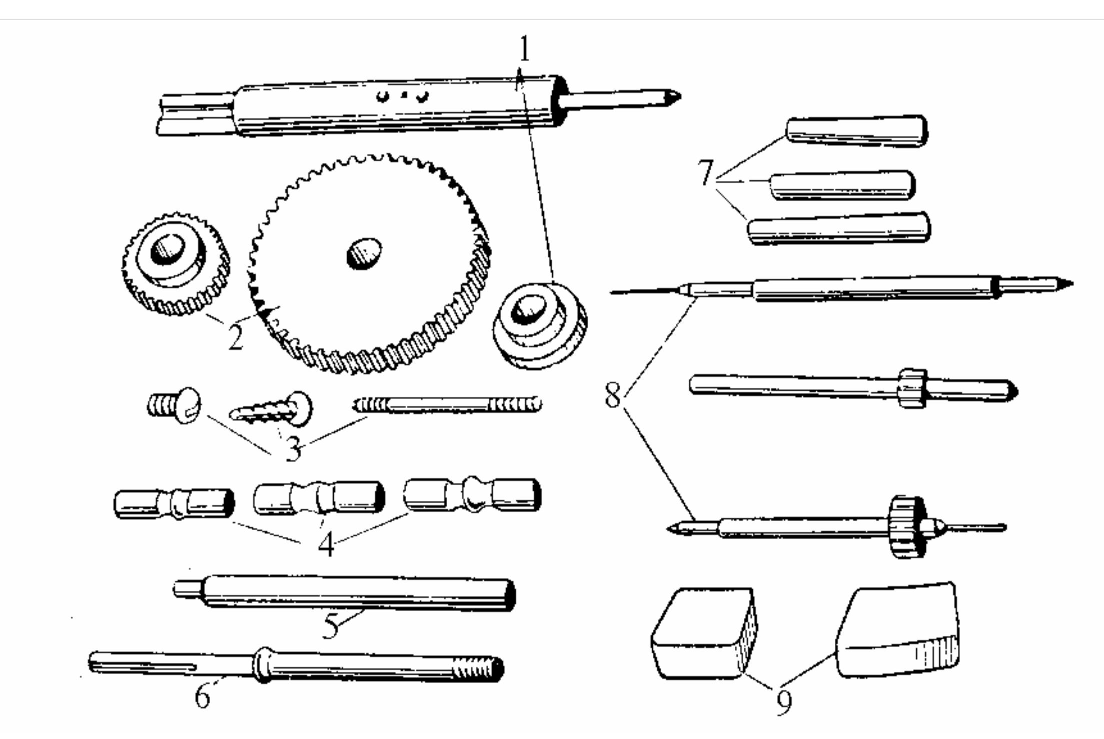


Рис. 10.10. Детали, обработанные давлением в холодном состоянии

При этом формообразование деталей можно выполнять одновременно с осуществлением разделительных операций (вырубки, пробивки, отрезки). Применение магнитно-импульсной обработки позволило снизить трудоемкость изготовления деталей, уменьшить стоимость применяемой оснастки, улучшить условия труда.

Внедрение новых процессов холодной обработки давлением позволяет в ряде случаев улучшить структуру производства за счет снижения чрезмерно высокой трудоемкости и себестоимости обработки на металлорежущих станках.

10.5. Горячая штамповка из заготовок и полужидкого металла

Горячая штамповка из заготовок позволяет получить особо сложные детали. Размеры заготовки определяются в соответствии с объемом готовой детали, величиной угара и припусками на механическую обработку.

Заготовка должна иметь стандартизированные уклоны по наружной и внутренней поверхностям и радиусы закруглений. Толщина стенок готовой детали не может быть менее 4 мм (иногда допускается толщина стенки 2 мм). При малых сечениях заготовка трудно штампуется и после охлаждения деформируется.

При штамповке полужидкого металла камера сжатия совмещена с рабочей полостью формы (рис. 10.11.). Залитый в подогретую до 250°С матрицу 1 жидкий металл 2 под давлением пуансона 3 поднимается вверх, заполняя образованную матрицей и пуансоном рабочую полость формы. Температура заливки колеблется в пределах 600–650°С для алюминиевых сплавов и 880–920°С для латуни. Формообразование происходит при сопряжении пуансона, образующего внутренний контур детали, с матрицей, оформляющей ее наружный контур. После окончания формообразования динамическое давление переходит в статическое. При статическом давлении (порядка 40–60 МПа в течение 3–6 с) металл уплотняется, и завершается процесс его кристаллизации. Давление препятствует росту кристаллов, вследствие чего его структура получается мелкозернистой. При дальнейшей выдержке под давлением металл деформируется, что улучшает его механические свойства.

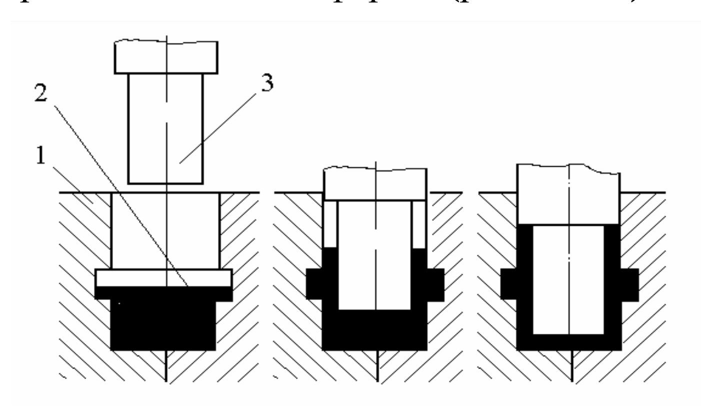


Рис. 10. 11. Схема процесса штамповки полужидкого металла

10.6. Электромагнитная штамповка

Электромагнитная штамповка основана на воздействии на заготовку электромагнитного поля. Токопроводящая (рис. 10.12) заготовка 1 помещается в поле соленоида 2. При прохождении импульсного тока по обмотке соленоида возникают магнитные поля 3 вокруг соленоида и заготовки. В результате взаимодействия этих полей заготовка будет сжиматься в направлении пуансона 4. При большом токе в обмотке соленоида силы сжатия могут быть настолько велики, что металл заготовки устремляется к поверхности пуансона. За счет пластической деформации заготовка повторит форму поверхности пуансона. В заготовке образуется канавка, и получается неразъемное соединение заготовки-втулки 1 и стержня-пуансона 4.

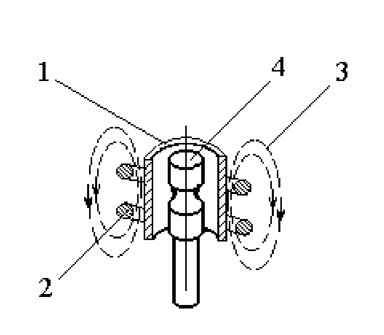


Рис. 10.12. Электромагнитная штамповка

Контрольные вопросы

1. В чем заключается суть обработки материалов давлением?
2. Какие требования предъявляются к материалам заготовок для листовой штамповки.
3. Какая основная цель преследуется при раскрое листового материала на заготовки? Способы раскроя листа на полосы.
4. Покажите разновидности раскроя полосы (ленты).
5. Классифицируйте основные процессы и операции холодной штамповки.
6. Какие исходные данные необходимы для расчета силы вырубки и пробивки? Приведите формулу для расчета усилия пробивки.
7. От каких параметров зависит минимальный радиус гиба?
8. В чем разница вытяжки с прижимом и без прижима?
9. В чем заключается операция штамповки выдавливанием? Способы выдавливания.
10. Какие точности достижимы при получении деталей выдавливанием?
11. Дайте характеристику бесштамповым методам обработки давлением. В чем преимущество этих методов по сравнению со штамповкой?
12. Суть электромагнитной штамповки.

Глава XI. Процессы обработки деталей приборов резанием

11.1. Общие положения

Обработка резанием – процессы механического срезания поверхностных слоев материала заготовок в виде стружки лезвийными или абразивными инструментами на металлорежущих станках с целью получения деталей с заданными формой, размерами и качеством поверхностей. Схемы стружкообразования при резании материалов различной твердости приведены на рис. 11.1.

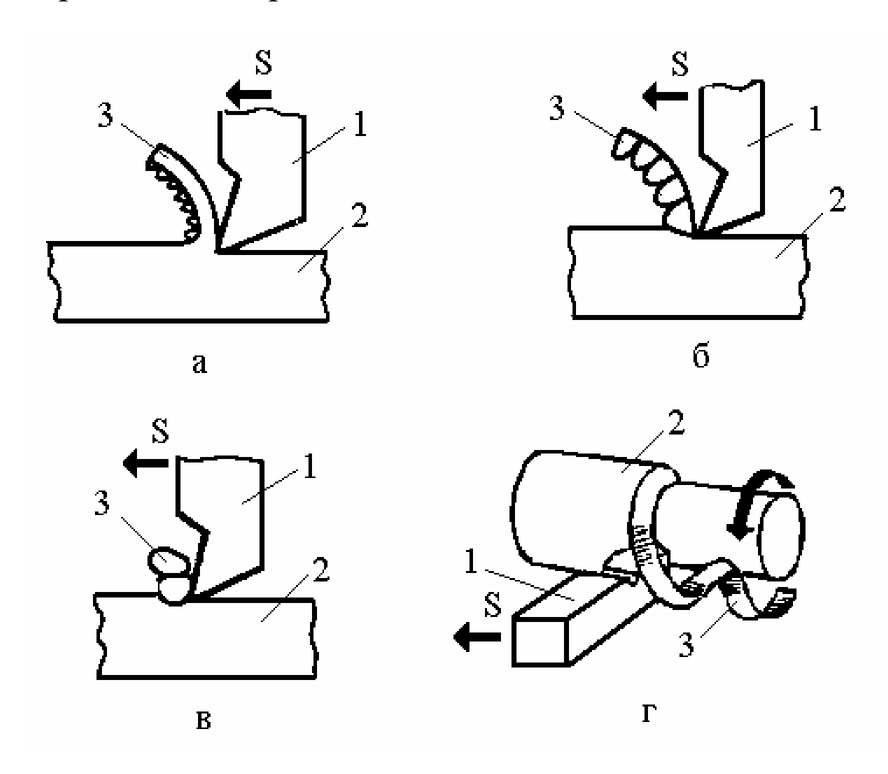


Рис. 11.1. Схемы стружкообразования при резании:
1 – резец, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – стружка, S – продольная подача резца; а – сливная стружка (мягкие, пластичные материалы); б – стружка скалывания (материалы средней твердости); в – стружка надлома (твердые и хрупкие материалы); г – схема образования сливной стружки при токарной обработке

Резанием обрабатывают детали, являющиеся чаще конструктивными: корпуса, рамки, панели, подложки плат, крепежные, центрирующие детали, отдельные элементы несущих конструкций в приборах (угольники, кронштейны, стержни оси, валы и др.). Материалы перечисленных деталей: алюминий и его сплавы, медь и сплавы на ее осно-

ве, стали, сплавы металлов с особыми физико-химическими свойствами, пластмассы и керамика.

Технологические процессы обработки резанием используют прежде всего для обеспечения заданной формы и взаимного расположения поверхностей деталей, их размеров и шероховатости. Через эти параметры совместно с другими технологическими мероприятиями формируются требуемые свойства деталей.

Основные виды процессов обработки резанием [3, 4, 7]: точение, растачивание, зенкерование, развертывание, сверление (рис. 11.2), фрезерование (рис. 11.3), строгание, протягивание, шлифование, полирование, суперфиниш, доводка.

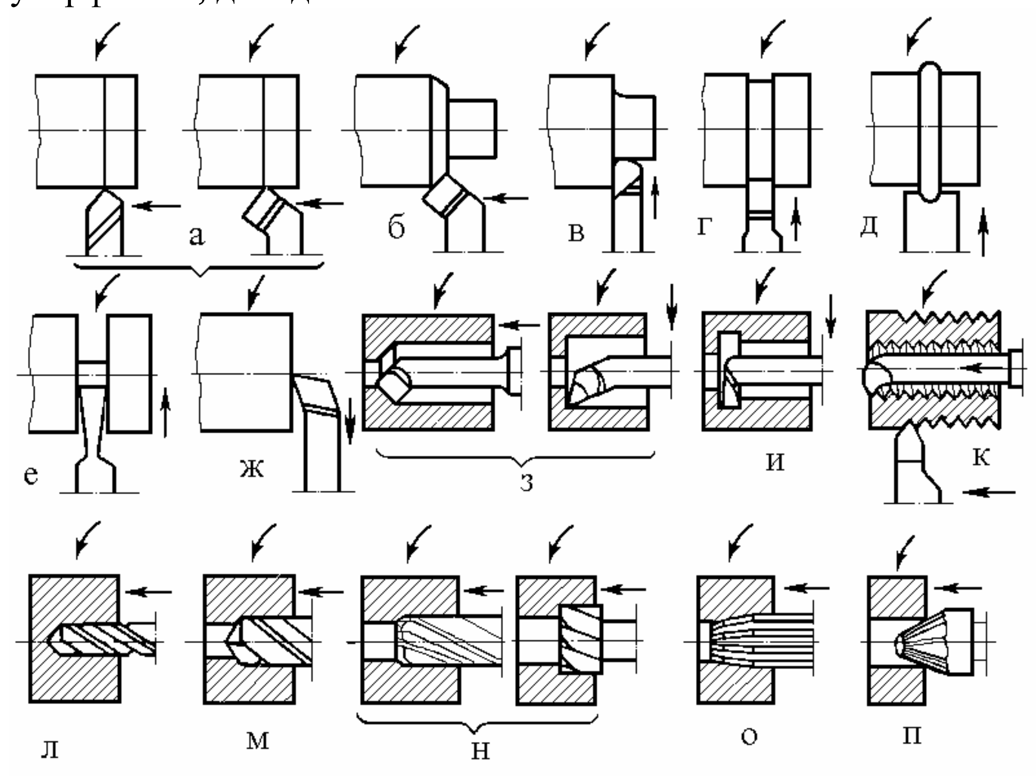


Рис. 11.2. Схемы токарной обработки и применяемый инструмент: а – наружная обработка цилиндрических деталей; б – обработка фасок; в – обработка галтелей; г – обработка канавок; д – обработка фасонной поверхности; е – отрезание; ж – пордезание торцов; з – растачивание внутренних поверхностей; и – проточка внутренних канавок; к – обработка внутренней и наружной резьбы; л – сверление; м – рассверливание; н – зенкерование; о – развертывание отверстий; п – зенкование

В зависимости от процесса и типа станка срезание поверхностных слоев заготовки происходит при движении или только инструмента (сверление на вертикально-сверлильном станке), или только заготовки

(строгание на продольно-строгальном станке), или при одновременном движении заготовки и инструмента (точение).

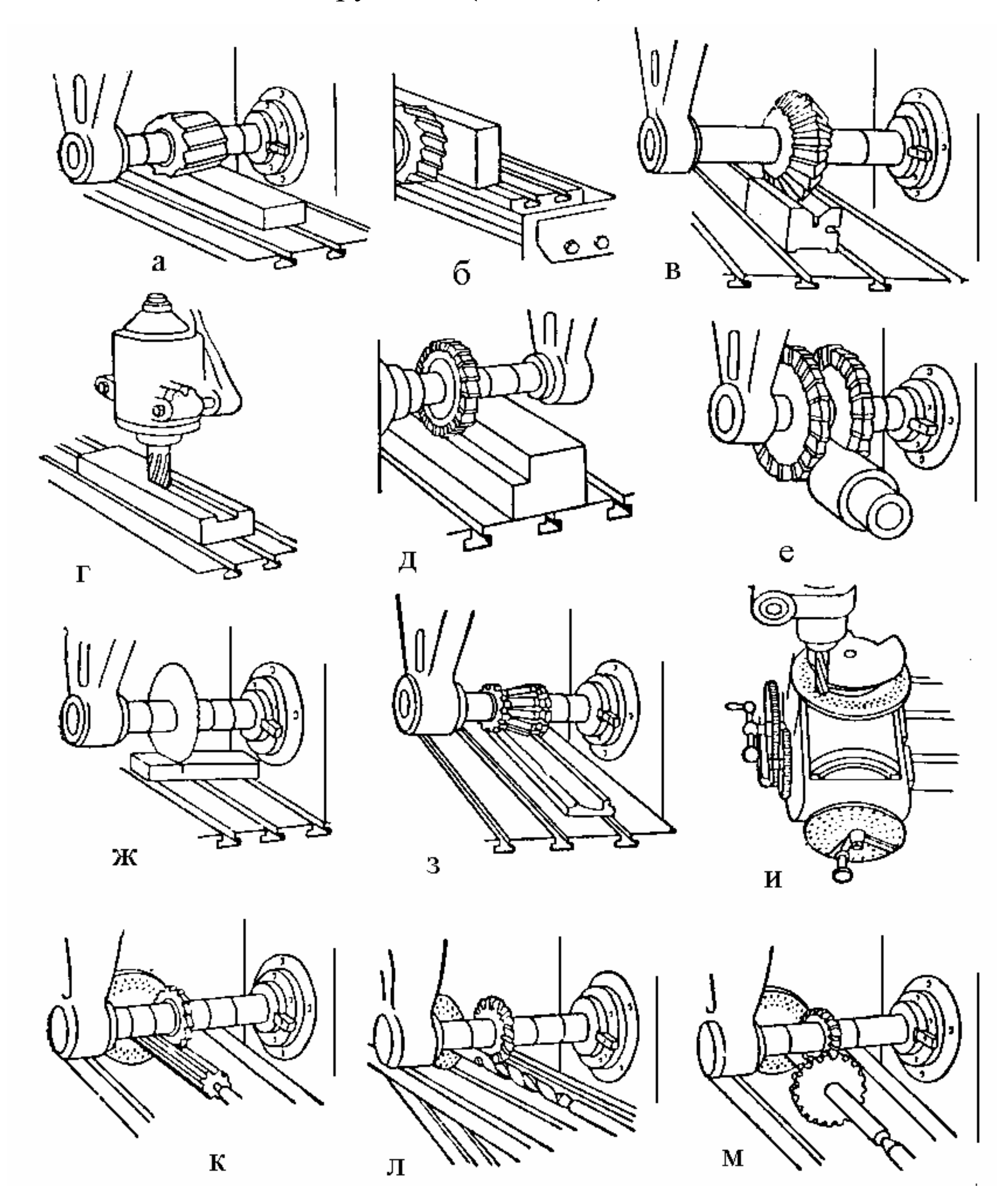


Рис. 11.3. Работы, выполняемые на фрезерных станках:
а – фрезерование плоскости цилиндрической фрезой; б – фрезерование плоскости торцевой фрезой; в – фрезерование наклонной плоскости;
г – фрезерование паза концевой фрезой; д – фрезерование уступа дисковой трехсторонней фрезой; е – фрезерование набором двух дисковых трехсторонних фрез; ж – разрезание отрезной фрезой; з – фрезерование фасонной фрезой; и – фрезерование криволинейного контура концевой фрезой; к – фрезерование шлицевых канавок на валике; л – фрезерование винтовых канавок; м – фрезерование зубчатого колеса

На обрабатываемой детали различают три поверхности – обрабатываемую, обработанную и поверхность резания (рис. 11.4).

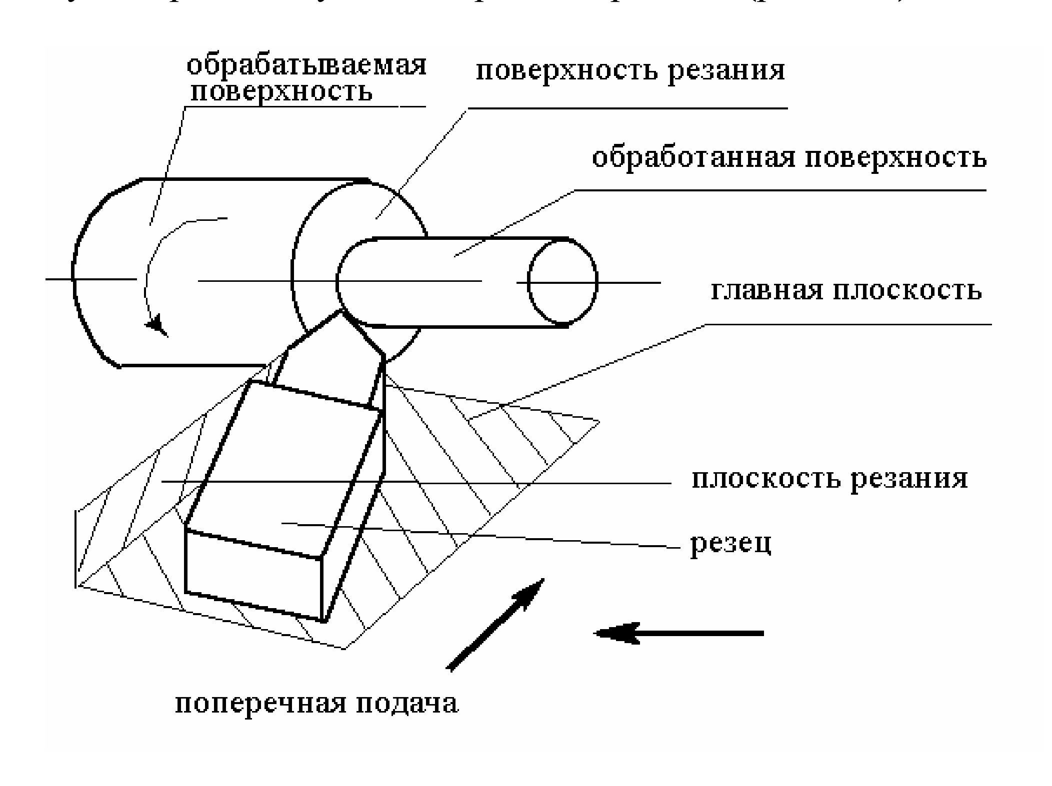


Рис. 11.4. Поверхности и координатные плоскости при обработке токарным резцом

Обрабатываемой поверхностью называется поверхность детали, подлежащая обработке.

Обработанной поверхностью называется поверхность детали, полученная после снятия стружки.

Поверхностью резания называется поверхность, образованная непосредственно режущей кромкой на обрабатываемой детали.

Формообразование обработанной поверхности происходит в результате сочетания двух основных движений резания. Одно из этих движений, скорость которого является наибольшей, называется *главным движением*, а другое – *подачей.*

Главное движение может быть вращательным или поступательным. Это движение придается заготовке или инструменту.

Движение подачи придается режущему инструменту или заготовке и может быть непрерывным и прерывистым.

К **вспомогательным движениям** относятся установка режущего инструмента на глубину резания, подвод и отвод режущего инструмента и др.

Характерным инструментом, применяемым при обработке резанием, является резец. Геометрические параметры режущей части и процесс резания другими инструментами (фрезами, сверлами, протяжками и др.) весьма сходны с геометрией и процессом резания резцом.

11.2. Резец, его части и элементы

Резец (рис. 11.5, а) состоит из *рабочей части* (головки) 1 и стержня (тела) 2. Стержень изготавливается из обычной углеродистой стали и служит для закрепления резца в суппорте или державке. Головка резца оснащается пластинкой 3, изготовленной из быстрорежущей стали, твердого сплава или керамики и затачивается под наиболее выгодными для данных условий обработки углами. Рабочую часть резца ограничивают поверхности (грани): передняя 4, по которой сходит стружка; главная задняя 5 и вспомогательная задняя 6, обращенные к обрабатываемой поверхности. Пересечения этих поверхностей образуют соответственно главную режущую кромку 7, выполняющую основную работу резания, и вспомогательную режущую кромку 8. Пересечение режущих кромок образует вершину резца 9.

Большое применение получили резцы с державкой 1 и многогранными неперетачиваемыми пластинками 2, предназначенные для обработки стали и чугуна (рис. 11.5, б–в).

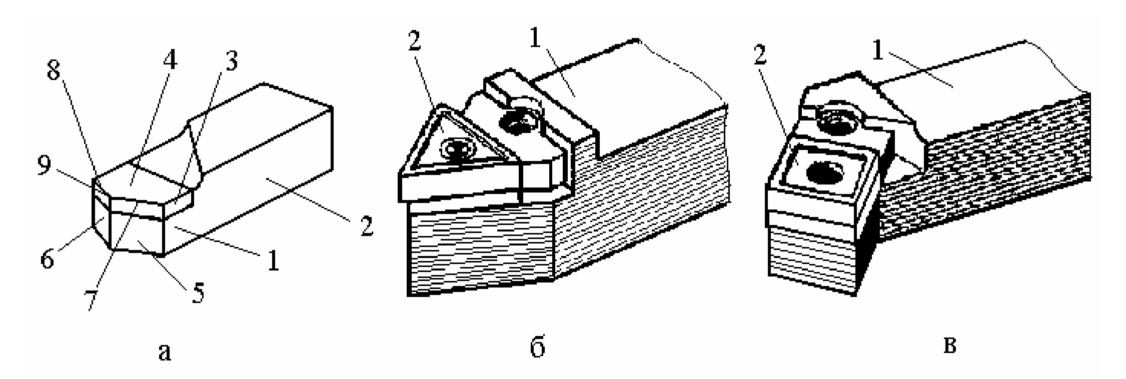


Рис. 11.5. Резец и его элементы: а – резец с припаянной пластинкой из твердого сплава; б – резец сборный с механическим креплением трехгранной пластины; в – резец сборный с механическим креплением четырехгранной пластины

Резцы классифицируют: по направлению подачи – на правые и левые, правые резцы на токарном станке работают при подаче справа налево (рис. 11.2, а, б, з); по конструкции головки – на прямые (рис. 11.2, в), отогнутые (рис. 11.2, б) и оттянутые (рис. 11.2, г, е); по виду

обработки – на проходные, подрезные, отрезные, расточные, фасонные, резьбонарезные и др. (рис. 11.2 а–к) и другим признакам.

11.3. Режимы резания

Любой вид обработки резанием характеризуется режимами резания: скоростью резания **V,** подачей **S** и глубиной резания t. Например, при продольном точении (рис.11.6) *скорость резания* – это окружная скорость (м/мин) обрабатываемой поверхности 1 относительно режущей кромки 4 резца, *подача* – это перемещение режущей кромки резца относительно образующей обработанной поверхности 3 (параллельно оси вращения заготовки, мм/об), *глубина резания* – толщина срезаемого с заготовки слоя за один рабочий ход (расстояние между поверхностями 1 и 3 по нормали) в миллиметрах.

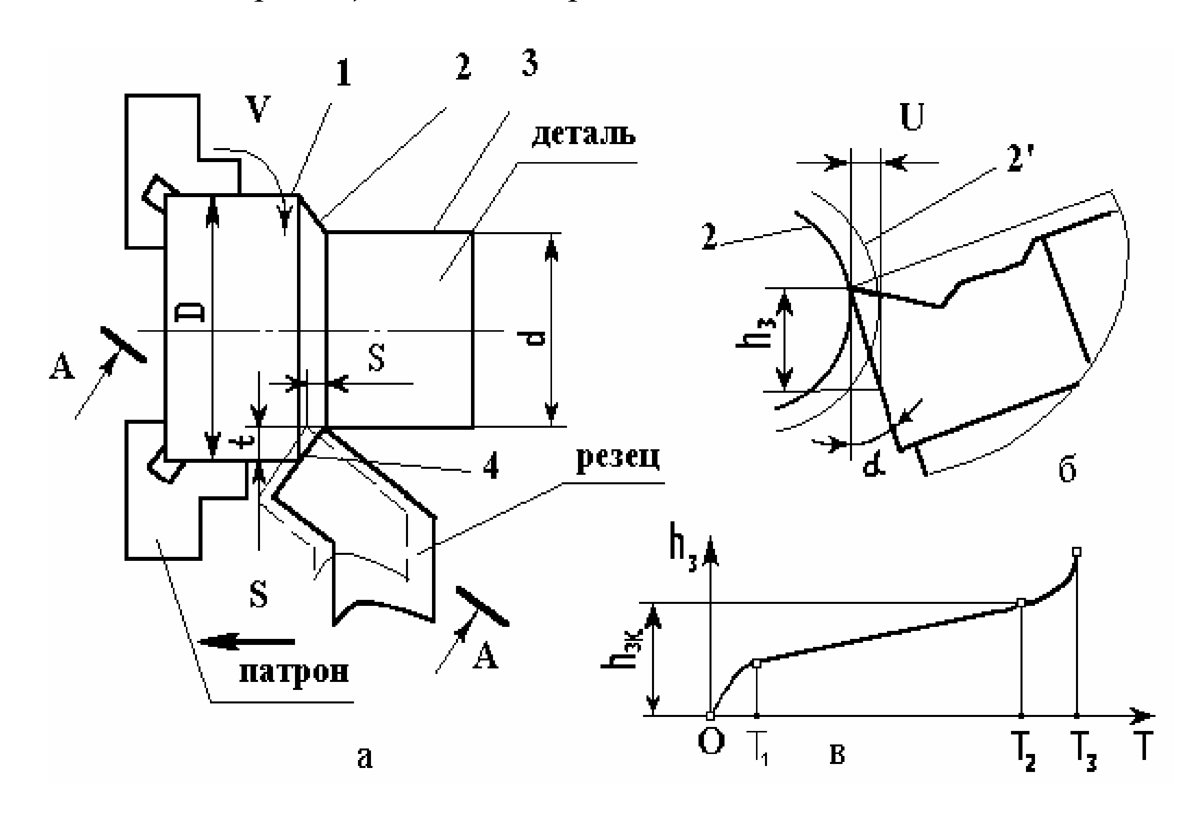


Рис. 11.6. Режимы резания

Численные значения параметров режимов резания назначают с учетом свойств обрабатываемых и инструментальных материалов, требований к точности, шероховатости и физико-химических свойств обработанных поверхностей, геометрии режущей части инструмента и характери-

стик используемого станка. Рекомендации по выбору режимов резания содержатся в справочной литературе [10].

Процессы обработки резанием имеют свои уникальные возможности: малую энергоемкость и большую объемную производительность; широкий диапазон реализуемой точности и шероховатости обработанных поверхностей (характеристики методов резания по этим параметрам приведены в табл. 11.9); относительная простота и универсальность формы режущих инструментов, обеспечивающих получение простейших и сложных поверхностей.

Следует отметить, что резание материалов сопровождается возникновением сил резания (рис. 11.7) и тепловыделением в зоне образования стружки, износом инструмента и образованием дефектного слоя, физические свойства которого отличаются от физических свойств исходного обрабатываемого материала.

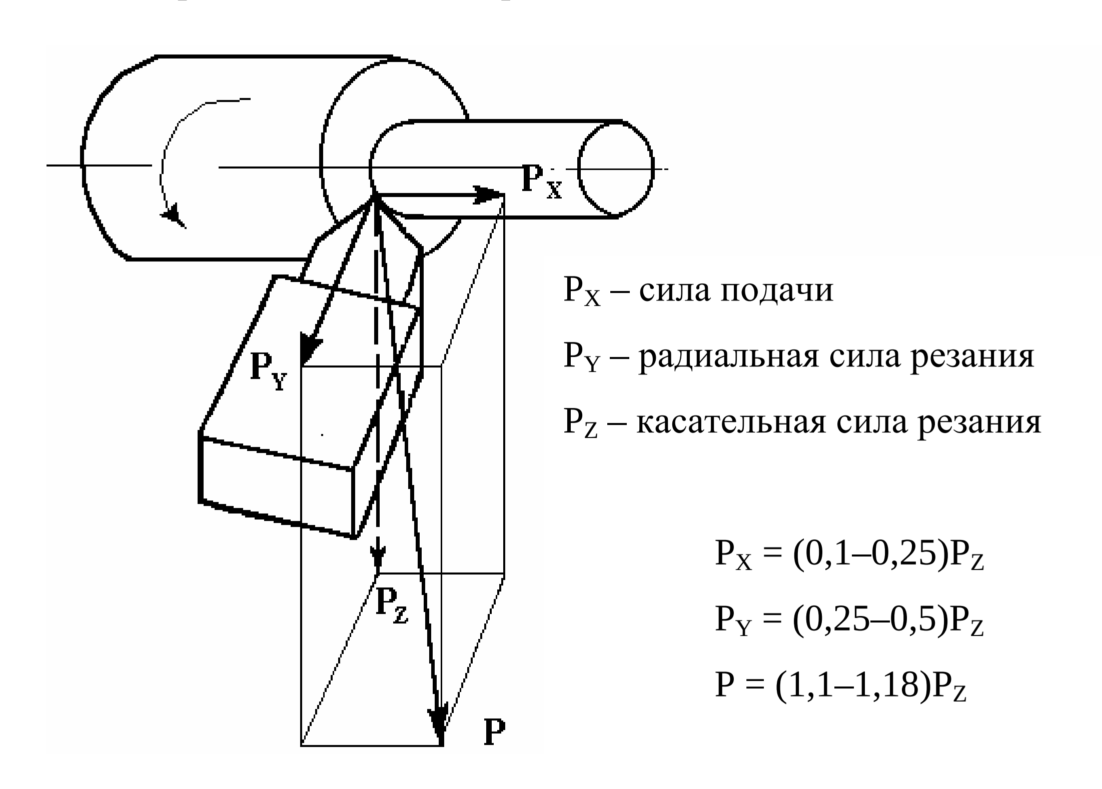


Рис. 11.7. Силы резания при точении

Размер дефектного слоя зависит от вида процесса резания и приводится в табл. 11.1. Из перечисленных сопутствующих резанию явлений важнейшее практическое значение имеет износ инструмента, непосредственно связанный с точностью, производительностью и стоимостью обработки. Износ лезвийного инструмента проявляется появлением фаски износа $h_з$ (рис.11.6, б) на задней поверхности режущей части инстру-

мента, обращенной к поверхности резания, при чистовой обработке или лунки износа на передней поверхности при черновой обработке. Оба вида износа приводят к смещению режущей кромки и вершины резца на расстояние $U = h_з\ tg\alpha$ (рис.11.6, б), вызывающее изменение размера d детали на $\Delta d = 2U$.

Характер износа режущих инструментов во времени показан на рис. 11.6, в. За первый непродолжительный период времени T_1 инструмент прирабатывается, интенсивно изнашиваясь. Второй период времени работы от T_1 до T_2 характеризуется нормальным (умеренным) износом. Третий период от T_2 до T_3 вновь характеризуется повышенным износом и поломкой инструмента. Поэтому за рабочий период стойкости инструмента принимают отрезок времени $0–T_2$ и обозначают через T (без индекса), а значение $h_{зк}$ износа, соответствующее точке T_2, называют допустимым или критическим износом. При износе инструмента, равном $h_{зк}$, надо заменить инструмент. В зависимости от назначения и вида инструмента значения $h_{зк}$ устанавливают от 0,2 до 2 мм, а период стойкости от 15 мин до 1,5 ч.

Для обработки деталей приборов резанием применяют металлорежущие станки всех основных групп. При массовом и крупносерийном типах производства широко используют станки-автоматы, автоматические линии из специальных станков и транспортных средств. Для серийного и мелкосерийного производства характерно использование станков с ручным управлением, станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, гибких автоматизированных систем.

В технологический процесс обработки деталей резанием, как правило, включены сопутствующие операции, реализующие другие процессы обработки: химические, химико-термические, термические, гальванические и др. Поэтому термин «**Технологический процесс обработки детали резанием**» означает технологический процесс, состоящий из различных процессов обработки с большим количеством операций, выполняемых на металлорежущих станках.

Таблица 11.1

Точность размеров, шероховатость поверхности и глубина дефектного слоя при обработке резанием

Методы обработки резанием	Квалитет точности	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Глубина дефектного слоя, мкм
Точение и растачивание:			
черновое	11–14	5–40	20–120
чистовое	10	25–5	20–30
тонкое	7–8	0.32–0,63	5–10
Фрезерование и строгание:			
черновое	11–12	10–20	50–100
чистовое	8–11	1,25–5	20–50
тонкое	7–9	0,63–1,25	10–30
Сверление	12	5–20	25–70
Зенкерование	11	5–10	25–40
Развертывание:			
однократное	10–11	1,25	15–25
двухкратное	8–9	1,25	5–10
точное и ручное	5–7	0,63	3–5
Протягивание:			
внутреннее	8–11	2,5	15–25
наружное	8–10	1,25–5	10–50
Шлифование:			
предварительное	9	1,25–2,5	20
чистовое	6–8	0,63–1,25	5–15
тонкое	5–6	0,16–063	3–5
Полирование	без размеров	0,63–1,25	5–15
Суперфиниш	то же	0,16–0,63	3–5
Хонингование	то же	0,04–0,32	3–5
Доводка (притирка)	5 и точнее	0,01–0,32	0–5

11.4. Общая структура, точность, производительность и экономическая эффективность технологических процессов на металлорежущих станках

Структура технологического процесса обработки деталей резанием состоит из последовательного выполнения операций на фрезерных, токарных и других станках, изменяющих состояние полуфабриката, и контрольных операций. Содержание операций, их последовательность и количество зависят от требований к изготовлению деталей и типа производства. Чем выше требования к точности и шероховатости поверхности деталей и чем сложнее ее форма, тем больше требуется выполнить операций. Заданная точность и шероховатость поверхностей деталей формируется постепенно от операции к операции. Каждая из операций улучшает точность на 1–2 квалитета и снижает параметры шероховатости R_A и R_Z в 2–5 раз.

Практически всегда существует несколько технических возможностей реализации отдельных операций для определенных условий производства, из которых можно определить доминирующий экономически целесообразный вариант.

У деталей, обрабатываемых резанием, различают точность размеров, формы поверхностей и их взаимного расположения. Точность выполнения размеров отдельных поверхностей деталей задается на рабочих чертежах деталей и характеризуется допустимыми отклонениями размеров от номинального значения. Допустимые отклонения формы и расположения поверхностей составляют часть допуска на размеры этих поверхностей. Между заданными отклонениями размеров и шероховатостью поверхности должно быть соответствие. При жестких допусках на размеры нельзя назначить шероховатость, параметры которой близки к допускам, так как в этих случаях затруднен контроль размеров. На рис. 11.8 графиком представлено ограничение параметров шероховатости поверхности допуском на размеры. Пунктирной линией со стрелкой показан пример назначения параметра шероховатости Ra 0,32 для поверхности элемента детали с допуском на размеры не более 6,5 мкм. Требования точности назначают строго из эксплуатационных требований. Завышение требований точности вызывает необоснованное удорожание изготовления деталей (рис. 11.9, а), где С – стоимость детали.

Экономическая целесообразность применимости разновидностей процессов обработки также имеет пределы. На рис. 11.9, б изображена зависимость стоимости обработки от точности для процессов: 1 – тонкое точение, 2 – предварительное шлифование, 3 – чистовое точение.

Как следует из рисунка, при обработке деталей точнее 8 квалитета целесообразно использовать тонкое точение, а для 8, 9 и более грубых квалитетов точности снижение стоимости обработки обеспечивает чистовое точение.

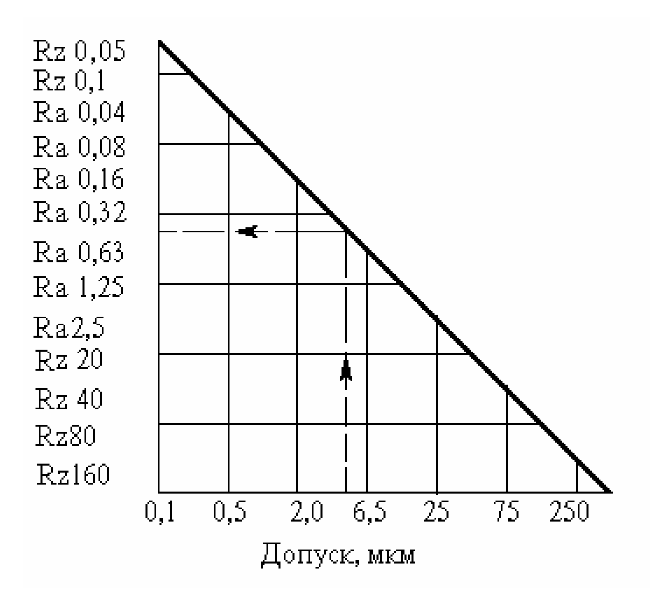


Рис. 11.8. Ограничение параметров шероховатости поверхности допуском на размер

Заданная точность при обработке резанием достигается различными методами. В единичном производстве используют метод пробных проходов и промеров, при котором выверяют установленную на станок заготовку и последовательными рабочими ходами, сопровождающимися пробными измерениями детали, приближаются к заданному размеру. При этом методе точность обработки в значительной мере зависит от квалификации рабочего. В массовом и серийном производстве применяют метод автоматического получения размеров на предварительно настроенном на получение размеров станке. Заготовку устанавливают и закрепляют без выверки в специальном приспособлении, обеспечивающем одинаковость положения на станке всех деталей партии при последовательной их обработке.

В процессе обработки одновременно действует несколько факторов, каждый из которых вызывает определенную долю суммарной погрешности. Слагаемые суммарной погрешности называют первичными погрешностями. Основными факторами, вызывающими первичные погрешности, являются: погрешность установки заготовки в приспособление, упругие деформации технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь (сокращенно СПИД)» от действия

сил резания, размерный износ режущего инструмента, геометрическая неточность станка, погрешность настройки станка на выполнение размера, тепловые деформации системы СПИД. Погрешность установки при обработке партии деталей проявляется как случайная погрешность и состоит из погрешностей базирования, закрепления и неточности приспособления.

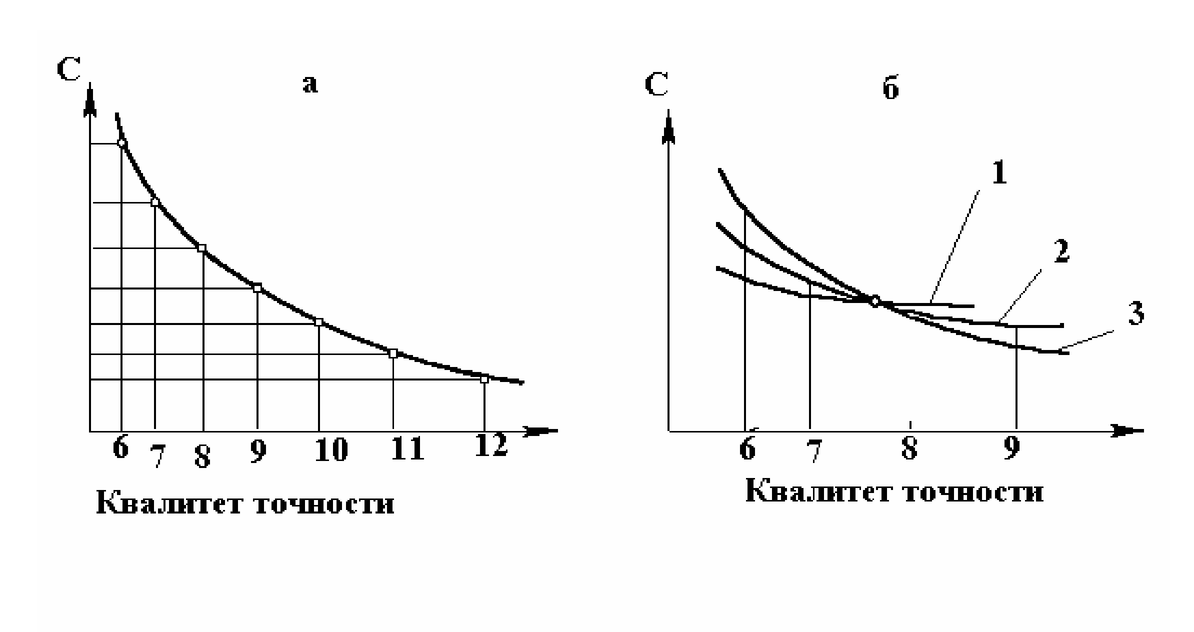


Рис. 11.9. Зависимости стоимости детали от точности обработки

Погрешность базирования вызывается погрешностями изготовления поверхностей заготовки, используемых в качестве технологических установочных и измерительных баз. Технологическими установочными базами называют те поверхности заготовки, которыми она устанавливается в приспособлении, а измерительными базами – поверхности, от которых ведут измерение выполняемого размера. Одни и те же поверхности, как частный случай, могут быть одновременно и установочными, и измерительными. В зависимости от конкретной схемы установки заготовки в приспособление погрешности изготовления установочных и измерительных баз могут входить в погрешность выполняемого размера полностью, частично или не входить совсем.

Погрешность закрепления вызывается смещением заготовки под действием сил зажима. Изменением направления сил зажима погрешность можно уменьшить. Неточность приспособления вызывается погрешностью изготовления и сборки, износом установочных элементов, ошибками установки и закрепления корпуса приспособления на станке.

При использовании одного и того же приспособления для обработки партии деталей погрешность неточности приспособления проявляется как систематическая постоянная погрешность, а при использовании нескольких приспособлений – как случайная погрешность.

Упругие деформации системы СПИД проявляются как случайные величины для разных обрабатываемых деталей одной и той же партии. Это обуславливается тем, что в процессе обработки силы резания изменяются по значению из-за непостоянства размеров в партии, нестабильности механических свойств материала заготовок и увеличивающегося износа инструмента. Упругие отжатия зависят как от сил резания, так и от жесткости элементов системы СПИД и непосредственно влияют на погрешность формы обработанных поверхностей и выполняемых размеров деталей в партии. Уменьшение действия этого фактора возможно через изменение режимов обработки.

Размерный износ инструмента проявляется как систематическая закономерно изменяющаяся погрешность при чистовой обработке. Уменьшить влияние этого фактора можно систематической подналадкой станка на размер в период между заменами инструментов. Износ инструмента относительно пути резания зависит от условий резания и для различного сочетания обрабатываемых и инструментальных материалов колеблется в пределах 0,5–12 мкм/км при обработке сталей твердосплавным инструментом, а при обработке цветных сплавов алмазным инструментом – 0,0005–0,001 мкм/км.

Геометрическая неточность станка характеризуется погрешностями взаимного расположения неподвижных и перемещающихся узлов станка, погрешностями траектории их взаимных движений. Она вызывает искажение формы и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей, но не оказывает влияния на погрешность выполняемых размеров. Этот вид первичной погрешности проявляется как систематическая погрешность формы и взаимного расположения обработанных поверхностей.

Погрешности изготовления мерных и фасонных инструментов переносятся на выполняемые форму и размеры и проявляют себя как систематические погрешности. В отдельных случаях использования осевого инструмента (сверл, зенкеров, разверток) наблюдается дополнительное явление разбивки отверстия, вызванное погрешностями заточки инструмента и отклонением оси инструмента от оси его вращения.

Погрешность настройки станка на выполняемый размер, как случайная величина, зависит от метода настройки, разрешающей способ-

ности измерительных приборов и оснащения для настройки, методов расчета смещения инструмента при настройке на размер и квалификации наладчика. Используют два метода настройки станка на автоматическое получение размера. По первому методу установку режущего инструмента выполняют последовательным приближением к заданному чертежом размеру обработкой пробных деталей, размеры которых измеряют, выполняют смещение режущего инструмента по результатам измерения и повторяют перечисленные действия, пока не будет обеспечена требуемая точность обработки. По второму методу для установки режущего инструмента на размер на неработающем станке используют эталон и обработку пробных деталей не производят. Погрешность изготовления эталона по форме и размерам, соответствующего обрабатываемой детали, влияет на погрешность установки инструментов. Настройка по пробным заготовкам более точная, но более трудоемкая и применяется для станков с относительно простой наладкой. Настройка по эталону менее трудоемка, достаточно точна, но не учитывает реальных условий обработки. Второй метод имеет еще более существенное преимущество – можно выполнить настройку блоков инструментов вне станка, что повышает эффективность использования станков. Этот метод широко используется как в массовом производстве, так и в серийном, особенно при применении станков с ЧПУ.

Тепловые деформации системы СПИД существенны для обработки особо точных деталей. Для снижения влияния этого фактора используют охлаждение заготовок и инструмента смазывающе-охлаждающей жидкостью или газом, начинают обработку после пуска станка только при достижении теплового равновесия системы СПИД, при котором выделение тепла в зоне резания и механизмах станка количественно равно его рассеиванию в окружающую среду.

Обработку особо точных деталей ведут в термоконстантных помещениях, где температура поддерживается с точностью до градуса. Отдельные первичные погрешности в общем балансе составляют: погрешность установки до 20–30%; погрешность от упругих деформаций системы СПИД под действием сил резания до 30%; погрешность от размерного износа режущего инструмента для чистовой обработки партий деталей в пределах 10–20%; погрешность геометрической неточности станка до 10–30%, погрешность изготовления мерных и фасонных инструментов менее 10%; погрешность настройки станка на выполнение размера до 30–40% при чистовой обработке и до 20–30% при чер-

новой обработке; погрешность тепловых деформаций СПИД в отдельных случаях до 10–15%.

Основными показателями эффективности обработки резанием являются производительность и стоимость обработки. Производительность процесса обработки резанием – это количество деталей заданного качества, изготовленных в единицу времени. Для случая одноинструментальной однопроходной операции точения производительность Q вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{1}{\left(\dfrac{L}{n \cdot S} + \dfrac{t_{см} \cdot L}{n \cdot S \cdot T} + t_в + t_{n\Sigma}\right)}, \qquad (11.1)$$

где L – длина рабочего хода, мм; n – число оборотов шпинделя в минуту, выбираемое в зависимости от рекомендуемой скорости резания V и диаметра заготовки d; $n = 1000V/\pi d$; S – подача в мм/об; $t_{см}$ – время на замену затупившегося инструмента и настройку станка на размер; T – стойкость режущего инструмента, мин; $t_{n\Sigma}$ – время на организационное обслуживание и регламентированные перерывы, отнесенные к обработке одной детали. Из выражения (11.1) видно, что производительность операции зависит, в том числе и от режимов обработки.

При интенсификации режимов резания первое слагаемое знаменателя в выражении (11.1) всегда уменьшается, а второе зависит от режимов более сложным образом, поскольку стойкость инструмента зависит нелинейно от режимов, в первую очередь от скорости резания и других условий обработки и для случая точения описывается выражением

$$T = \left(c_v \cdot k_v / V_t^{x_v} \cdot S^{y_v}\right)^{1/m}, \qquad (11.2)$$

где c_v, x_v, y_v, m – некоторые постоянные коэффициенты для типовых условий резания; k_v – коэффициент, учитывающий отличие конкретных усилий резания от типовых.

Зависимость производительности Q от скорости резания V при неизменных прочих условиях имеет максимум (рис. 11.10) с его смещением в сторону увеличения скоростей при уменьшении подачи.

Кривые Q_1, Q_2 и Q_3 соответствуют подачам $S_1 > S_2 > S_3$. Рис. 11.10 показывает, что интенсификация режимов ведет к увеличению производительности только до определенного значения. При дальнейшей интенсификации режимов производительность падает, так как выигрыш от

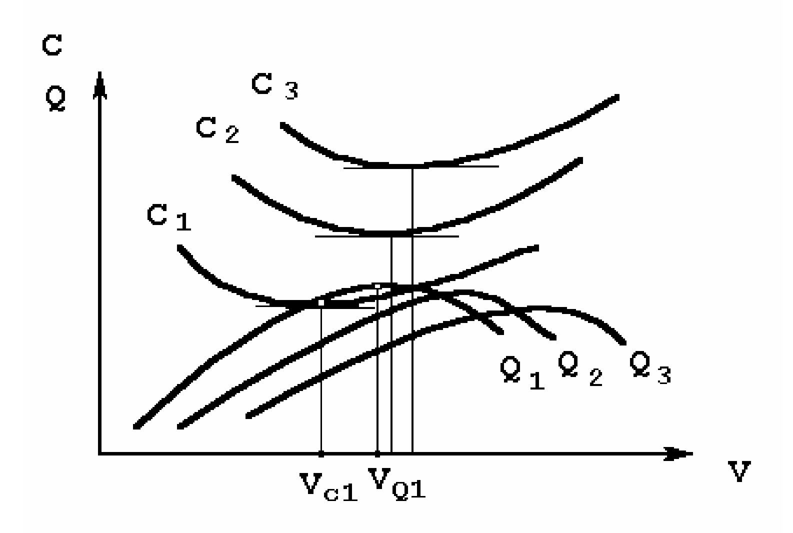


Рис. 11.10. Зависимость производительности ***Q*** *и себестоимости С обработки от скорости резания и величины подачи*

сокращения основного времени резания перекрывается возрастающими расходами времени на замену затупившегося инструмента и настройку станка из-за низкой стойкости инструмента при высоких скоростях резания. Кроме того, на интенсификацию режимов резания оказывает влияние система СПИД, ограничивая их наибольшие допустимые значения мощностью главного привода, допустимыми усилиями зажима, прочностью слабых звеньев привода подачи.

Экономическая эффективность обработки резанием оценивается себестоимостью обработки

$$C_{\text{Т}} = C\, t_{\text{шт}} + C_{\text{э}} t_o + \sum_{i=1}^{p} C_{\text{инi}} t_{\text{смi}} / T \ , \qquad (11.3)$$

где С, $C_{\text{Э}}$ и $C_{\text{инi}}$ – постоянные, соответственно учитывающие затраты на эксплуатацию оборудования, стоимость электроэнергии и расходы на эксплуатацию инструментов.

Выражение (11.3) является общим для других экономических показателей эффективности – приведенных затрат и полной стоимости. Если в постоянных учитываются капитальные вложения и текущие расходы, то $C_{\text{Т}}$ – приведенные затраты на обработку. Если не учитывать только капитальные вложения, то $C_{\text{Т}}$ соответствует полной себестоимости.

С учетом выражений (11.2) зависимость (11.3) для случая точения можно привести к виду

$$C_T = C\frac{1}{nS} + Cn^{\frac{1}{m}-1}S^{\frac{Y_V}{m}-1}, \qquad (11.4)$$

в котором одна часть расходов уменьшается, а другая увеличивается непропорционально при различной интенсификации режимов. Численные значения показателей степени колеблются: m = 0,08–0.85, Y_v = 0,95–1,05. Тогда при сочетании $\left(\frac{1}{m}\right) - 1 \rangle \left(\frac{Y_V}{m}\right) - 1$, что имеет место при точении, сверлении, фрезеровании и других методах лезвийной обработки, всегда экономически выгодно назначить подачи максимально возможными с учетом ограничений системы СПИД (по мощности резания, допустимым силам резания и усилиям зажима заготовки), а затем интенсифицировать скорость резания до значения, при котором численное значение выражения (11.2) будет наименьшим.

На рис. 11.10 стоимостям обработки C_1, C_2, и C_3 соответствуют подачи $S_1 > S_2 > S_3$. Для соотношения (1/m) – 1 = (Y_V/m) – 1, что характерно для шлифования и поперечного точения, минимум показателя эффективности достигается при различном сочетании произведений nS.

Отметим одну важную особенность расположения зависимостей С от **Q** на рис. 11.10 – экстремальные значения показателей эффективности не соответствуют одним и тем же режимам резания. Это значит, что для обработки резанием нельзя совместить максимальную производительность и наименьшую стоимость одновременно.

На стоимость обработки резанием кроме режимов резания влияет выбор станка. На рис. 11.11 приведена зависимость стоимости изготовления одной и той же детали на токарных станках различного типа от количества обрабатываемых деталей в партии и типа производства: 1 – универсальные станки общего назначения; 2 – специализированные станки; 3 – специальные станки и автоматические линии; 4 – станки с ЧПУ; 5 – обрабатывающие роботизированные системы станков с управлением от ЧПУ. Неправильный выбор станка значительно увеличивает стоимость обработки.

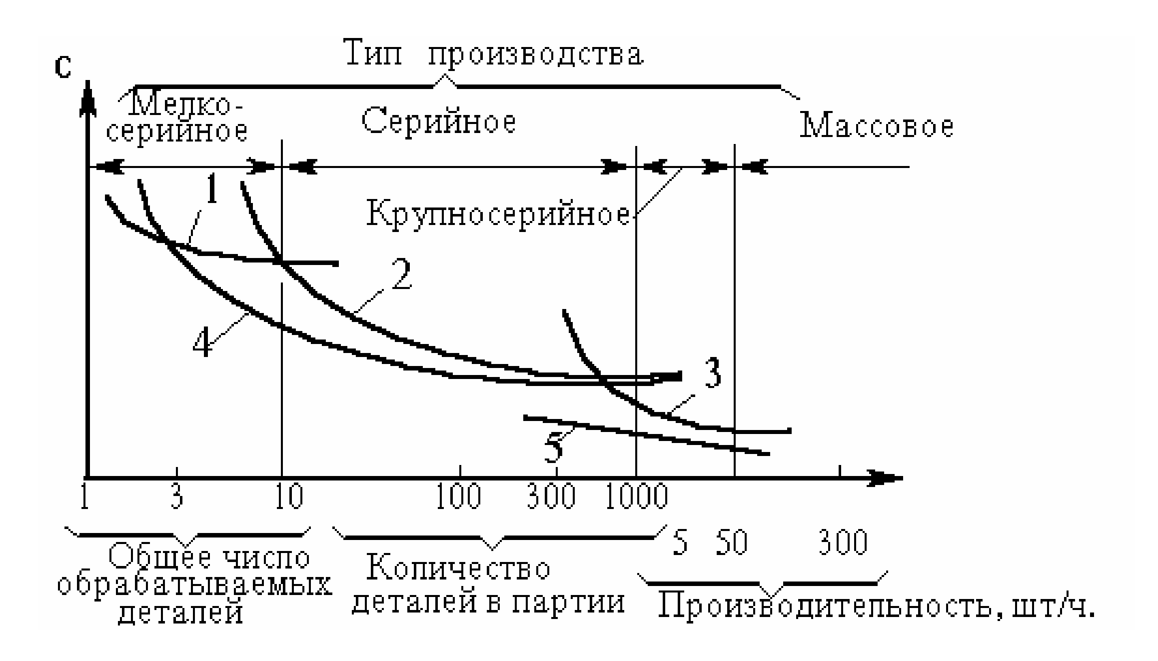


Рис. 11.11. Зависимость себестоимости обработки от типа производства

11.5. Содержание операций обработки деталей на металлорежущих станках

Содержание конкретной операции обработки резанием зависит от конструкции и материала обрабатываемой детали, от требований к точности ее размеров, формы и шероховатости поверхностей, выполняемых в рассматриваемой операции, от точности размеров и других параметров состояния, сформированных в предыдущих операциях технологического процесса, от типа и организационной формы производства. Кроме перечисленных факторов на содержание операции влияют технологические возможности металлорежущего станка, на котором осуществляется операция.

Рассмотрим несколько операций обработки резанием, характерных для производства приборов. При фрезеровании деталей приборов наиболее часто используют концевые фрезы для обработки плоских и пространственно сложных поверхностей и дисковые прорезные фрезы для обработки узких пазов и шлицев. Другие типы фрез применяются значительно реже.

Фрезерная операция состоит из одного или нескольких переходов. Типовые схемы простейших переходов, выполняемых концевыми фрезами, изображены на рис. 11.12, где: а – фрезерование криволинейных контуросложных поверхностей; б – фрезерование плоскостей; в –

фрезерование уступа; г – фрезерование паза; t – глубина резания; B – ширина фрезерования. Если произведение глубины фрезерования на ширину фрезерования превышает допустимое значение для технологической системы СПИД, то один и тот же элемент поверхности обрабатывают за несколько рабочих ходов. Экономически целесообразно обрабатывать поверхности детали за один рабочий ход. При обработке поверхности за несколько рабочих ходов последний чистовой рабочий ход выполняют с режимами, обеспечивающими требования к точности и чистоте этих поверхностей, а предыдущие рабочие ходы осуществляют с максимальным допустимым значением произведения tB. Припуск, оставленный на чистовую обработку, не превышает 0,2–0,3 диаметра фрезы по глубине фрезерования и 0,2 диаметра фрезы по ширине фрезерования. Для обеспечения точности обработки для черновых и чистовых рабочих ходов вместо одной фрезы используют разные фрезы. В этом случае рабочие ходы образуют самостоятельные переходы.

Токарные операции изготовления некоторых деталей приборов производят на токарных автоматах продольного точения. Принцип работы автомата продольного точения (рис. 11.13, а и б) основан на осевой подаче вращающегося прутка через неподвижную люнетную втулку. Резцы 1,2,3 и 4 имеют только поперечную подачу к оси вращения детали. Это позволяет с точностью до нескольких микрометров обрабатывать нежесткие детали с соотношением длины к диаметру, равным 10 и более. На автоматах продольного точения выполняют обтачивание ступеней, обработку за буртом (рис. 11.13, з), подрезку торцов, обработку канавок и конусов, сверление, расточку неглубоких отверстий, обработку фасонных поверхностей. С применением дополнительных устройств технологические возможности станка увеличиваются.

Последовательность и содержание рабочих переходов при изготовлении штырькового вывода (рис. 11.13, в) из ковара 29НК на автомате продольного точения, следующие:

1) точение радиусной фаски R0,1 мм резцом 4, имеющим участок режущей кромки, выполненной по радиусу (рис. 11.13, г);

2) точение конуса методом совмещения продольной подачи заготовки с поперечной подачей резца 3 (рис. 11.13, д);

3) точение первой ступени цилиндрической поверхности с продольной подачей заготовки неподвижным резцом 1 с использованием второй ступени неподвижного упора станка (рис. 11.13, е);

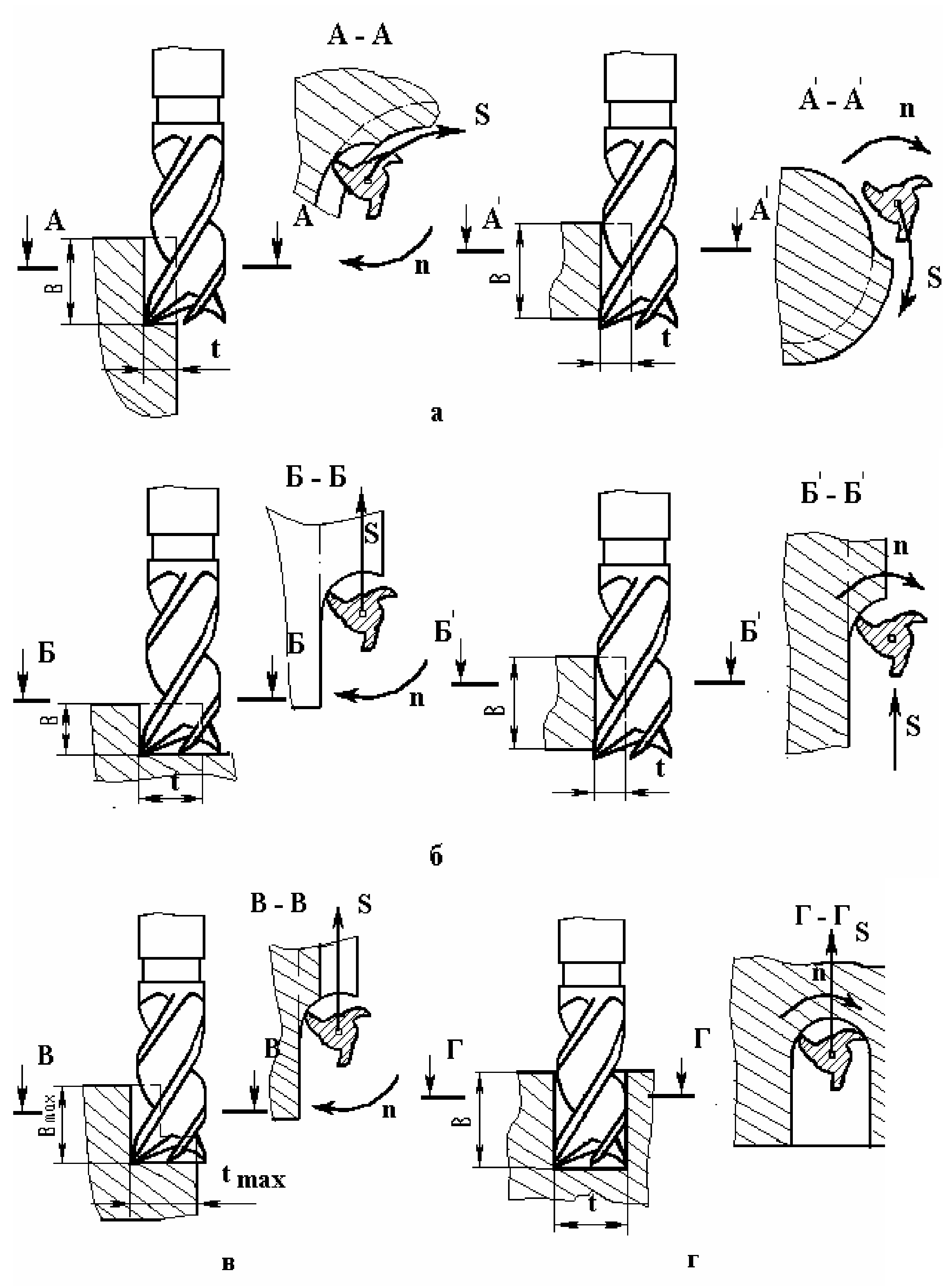


Рис. 11.12. Типовые схемы простейших переходов, выполняемых концевыми фрезами

4) точение второй ступени цилиндрической поверхности при продольной подаче заготовки и неподвижном после установки на размер резце 2 (рис. 11.13, ж);

5) точение цилиндрической поверхности за буртом резцом 1, установленным на размер кулачком (рис. 11.13, з);

6) отрезка детали на размер резцом 4 (рис. 11.13, и).

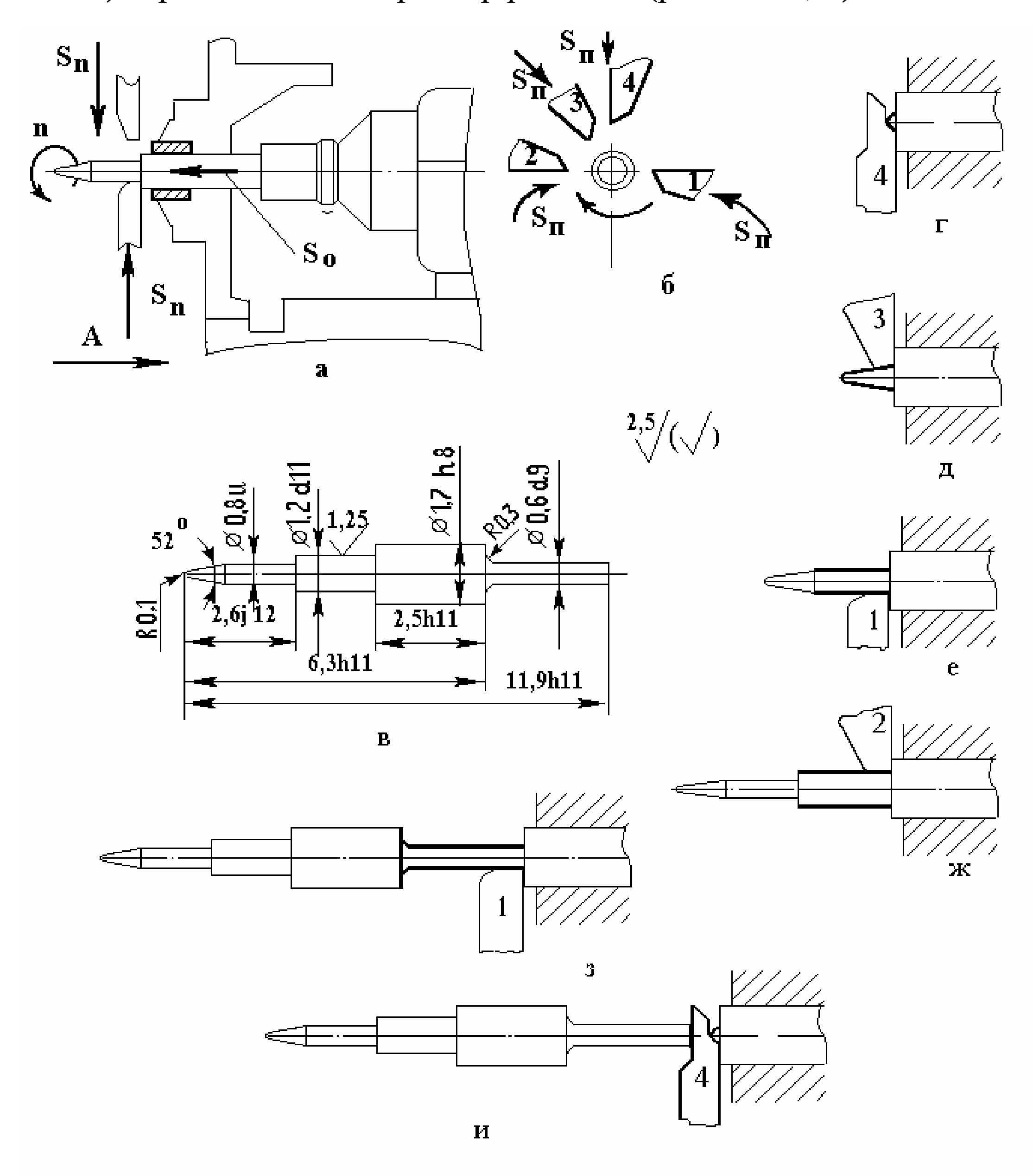


Рис. 11.13. Схема обработки штырькового вывода на токарном автомате продольного точения

Сверлильные операции состоят из нескольких переходов в зависимости от квалитета и формы обрабатываемых отверстий:

1. При обработке гладких отверстий по квалитету Н7 диаметром до 8 мм выполняют два перехода: сверление (рис. 11.14, а) и развертывание чистовой разверткой (рис. 11.14, в) с глубиной резания 0,3–0,05 мм на сторону, при диаметре обрабатываемого отверстия от 8 до 12 мм осуществляют три перехода: сверление, черновое и чистовое развертывание (при чистовом развертывании припуск на сторону 0,02 мм). Для отверстий свыше 12 мм четыре перехода: сверление, зенкерование (рис. 11.14, б) черновое и чистовое развертывание (при чистовом развертывании припуск зависит от диаметра обрабатываемого отверстия и составляет 0,02–0,04 мм на сторону).

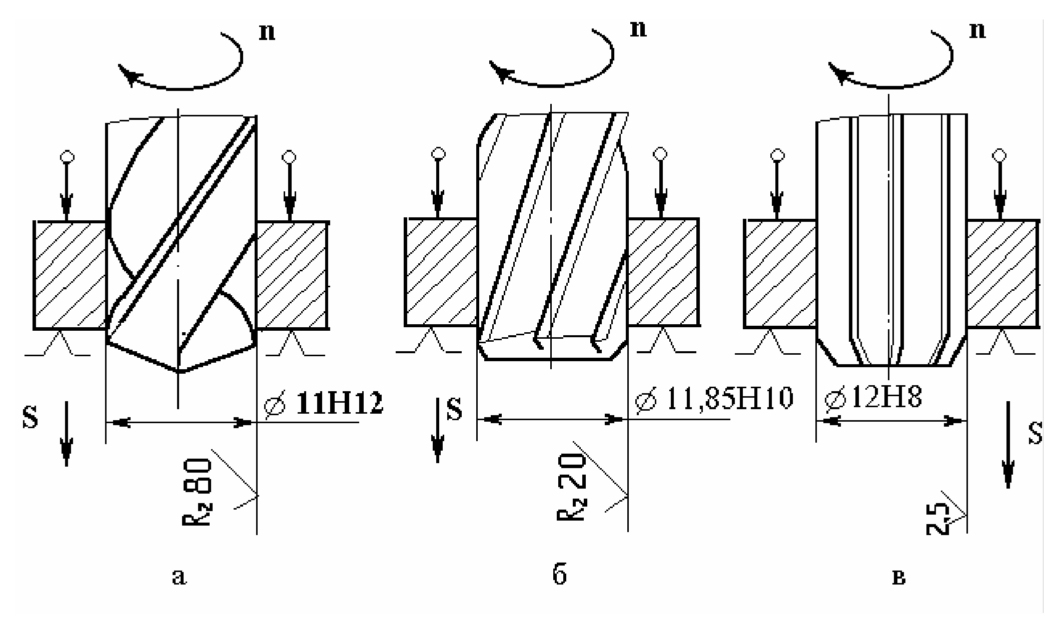


Рис. 11.14. Обработка гладких отверстий

2. При обработке гладких отверстий по квалитету Н8 и Н9 содержание операции отличается от рассмотренных выполнением только одного развертывания вместо двух.

3. При обработке резьбовых крепежных отверстий производят следующие переходы: сверление (рис. 11.15, а) по Н12 с учетом внутреннего диаметра резьбы; снятие фаски, шириной не менее высоты профиля резьбы (рис. 11.15, б) коническим зенкером или сверлом большого диаметра на входе в отверстие; нарезание резьбы метчиком (рис. 11.15, в).

4. При обработке ступенчатых отверстий каждую из ступеней обрабатывают за один или несколько проходов в зависимости от точности, а при крупносерийном и массовом производстве используют комбинированный специальный инструмент для обработки одновременно нескольких ступеней, благодаря чему сокращается количество переходов.

Трудоемкость и стоимость выполнения операций зависит от припуска, снимаемого при резании. Чем меньше припуск, тем выше показатели эффективности обработки резанием, но уменьшение припуска ограничивается определенным пределом.

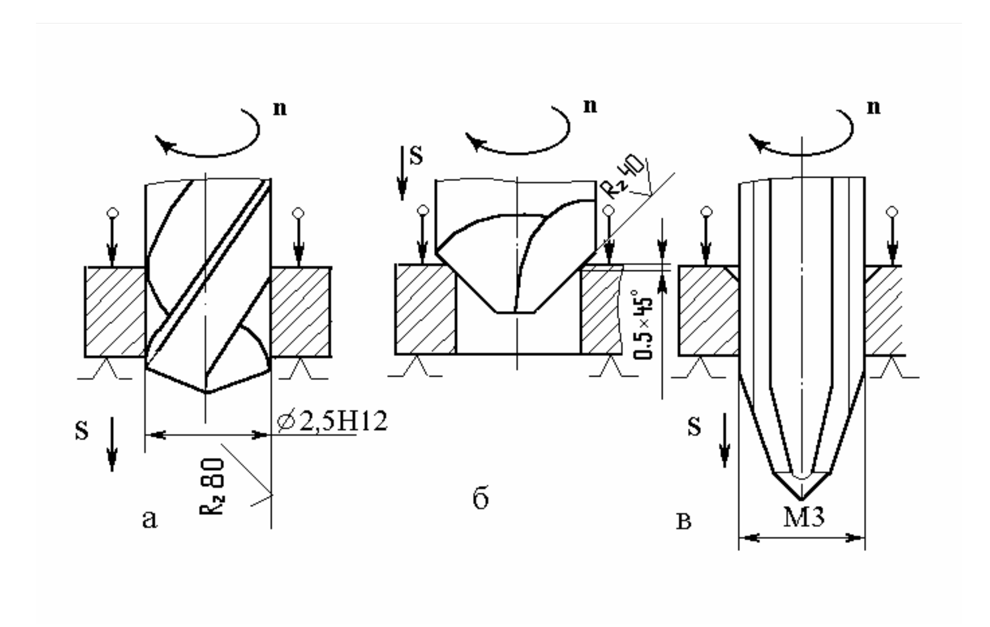


Рис. 11.15. Обработка резьбового крепежного отверстия

11.6. Общая структура технологических процессов изготовления деталей зубчатых передач

Детали зубчатых передач используются в приборных приводах, механических устройствах ввода-вывода информации и т.д. Основные виды деталей зубчатых приборных передач представлены на рис. 11.16, где а – шестерни-диски, б – зубчатые секторы, в – шестерня-втулка, г – двухвенцовые зубчатые колеса, д – валики-шестерни.

Материалы зубчатых колес: стали, сплавы на основе меди, специальные сплавы, пластмассы. Технологический процесс изготовления деталей зубчатых передач состоит из следующих этапов:

1. Комплекс операций, связанных с обработкой всех поверхностей заготовки, кроме нарезания зубьев зубчатого венца. Особое внимание при выполнении этапа уделяется изготовлению основных базовых поверхностей. При изготовлении незакаленных зубчатых колес на этом этапе производится обработка всех поверхностей с размерами, указанными на чертеже, а при изготовлении термически обработанных колес – оставляют припуск на дополнительную обработку базовых технологических поверхностей.

2. Обработка зубьев лезвийным инструментом (фрезерованием

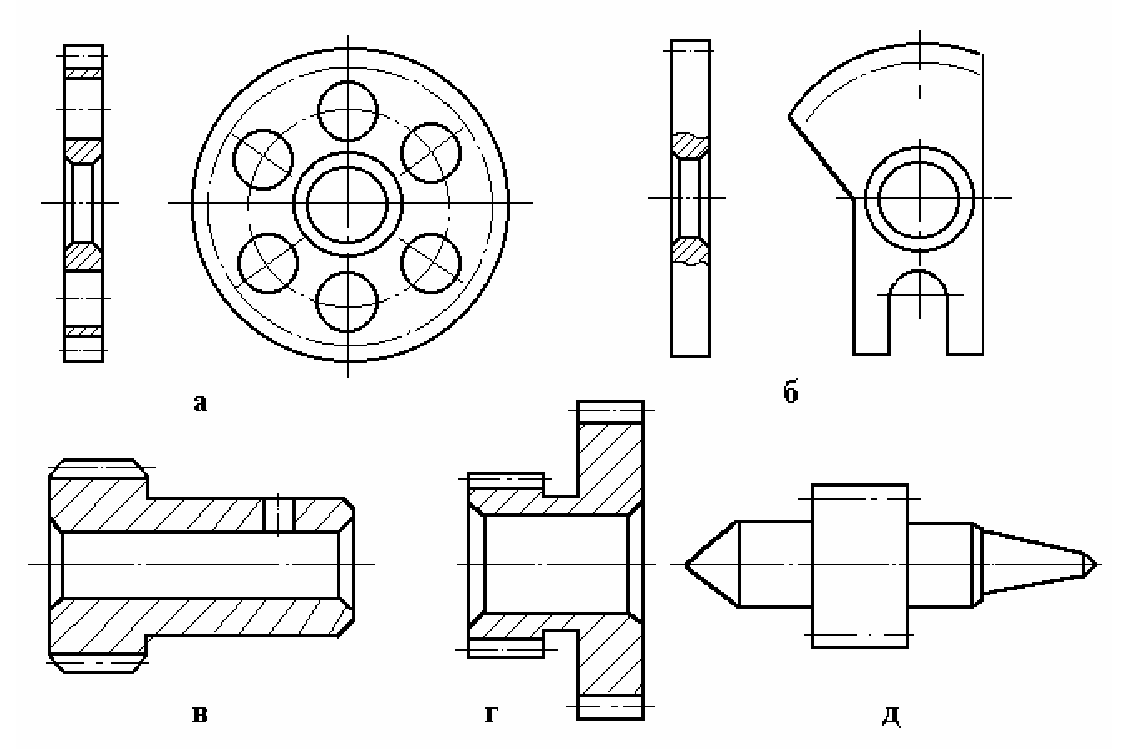


Рис. 11.16. Основные виды деталей зубчатых приборных передач

или долблением, или строганием). При обработке незакаленных зубчатых колес седьмой степени точности и грубее на этом этапе обеспечиваются все требования точности к боковым поверхностям зубьев зубчатого венца. При изготовлении зубчатых колес шестой степени точности и точнее боковые поверхности зубьев обрабатывают предварительно с оставлением припуска для их отделки.

3. Термическая обработка зубчатого венца или всего материала детали с целью повышения поверхностной твердости зубьев. Для стальных зубчатых колес применяют цементацию, закалку и азотирование.

4. Отделка посадочных и вспомогательных базовых поверхностей детали шлифованием с установкой детали на боковые поверхности зубьев или промежуточные технологические базовые поверхности.

5. Отделка рабочих поверхностей зубьев зубчатых венцов деталей, ранее термически обработанных шлифованием, хонингованием или доводкой. Процесс отделки зубчатого венца детали после термической обработки предусматривает уменьшение или полное устранение погрешностей, вызванных деформациями детали при термической обработке.

Конкретное содержание единичного технологического процесса изготовления деталей зубчатых передач зависит от большого числа факторов, основными из которых являются общая форма зубчатого колеса, количество и расположение зубчатых венцов на детали, форма зубьев колеса (прямые, винтовые), материал колеса и характер его термической обработки, точность зубчатого венца детали – основной фактор, определяющий структуру технологического процесса, габариты деталей зубчатых передач, тип производства.

Для условий серийного и крупносерийного производства обработку зубчатого колеса типа втулки (рис. 11.17, а) седьмой степени точности с модулем m = 0,3 осуществляют за 12 операций:

1. Заготовительная первая. Обтачивают фаски на двух концах прутка – исходной заготовки.

2. Заготовительная вторая. Промывают и протирают прутки.

3. Токарно-автоматная. Обрабатывают поверхности, обозначенные утолщенными линиями (рис. 11.17, а); поверхности 2,3 и 4,5 формируются окончательно; поверхности 6 и 7 – с припуском под последующую обработку; поверхности 1 не обрабатывают; в качестве технологической установочной базовой поверхности используют наружную поверхность прутка.

4. Токарная. Обтачивают поверхности 6 и 7,8 окончательно, ранее обработанные поверхности 2 и 3 используют как базы (рис. 11.17, б)

5. Токарная. Окончательно обрабатывают поверхность 1 (рис. 11.17, в) с установкой на поверхности 4 и 6.

6. Зубофрезерная. Фрезеруют зубья 9 на зубофрезерном станке (рис. 11.17, г).

7. Слесарная. Зачищают заусенцы зубчатого венца со стороны выхода фрезы.

8. Обкаточная. Обрабатывают боковые поверхности зубьев при зацеплении обработанной детали с эталонным колесом.

9. Контрольная. Проверяют основные параметры зубчатого колеса.

10. Моечная. Детали промывают в горячей воде и сушат.

11. Гальваническая. Подготавливают поверхности детали под покрытие в соответствии с требованиями чертежа. Выполняют комплекс переходов нанесения покрытия с последующей обработкой поверхности после покрытия.

12. Контрольная. Измеряют все параметры детали.

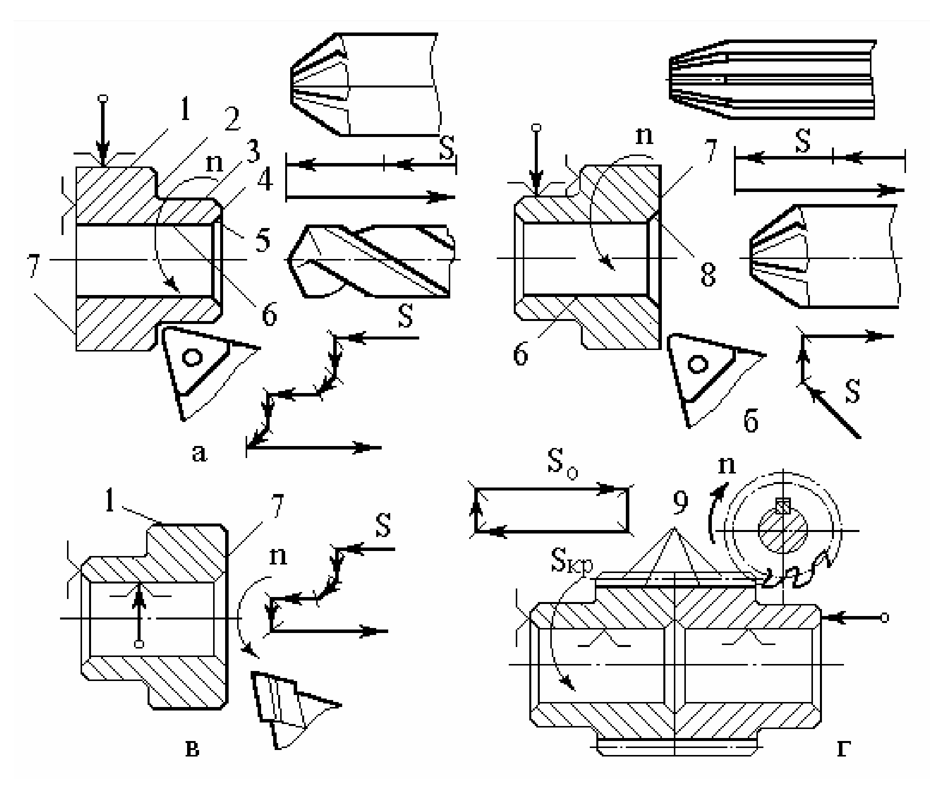


Рис. 11.17. Схема обработки зубчатого колеса типа втулки в условиях серийного производства

11.7. Повышение производительности и экономической эффективности технологических процессов на основе использования станков с числовым программным управлением и промышленных роботов

Средством дальнейшего повышения производительности и экономичности обработки резанием является комплексная механизация и автоматизация технологических процессов. Основным направлением автоматизации крупносерийного и массового производства остается оснащение производства современными станками-автоматами и авто-

матическими линиями с традиционными системами управления кулачкового и путевого вида. Для мелкосерийного производства такие средства автоматизации не подходят из-за большой стоимости изготовления кулачков, специальной оснастки и значительных затратах времени на их настройку. В мелкосерийном производстве необходимы принципиально новые средства автоматизации, сочетающие в себе производительность и точность традиционных станков-автоматов с гибкостью универсального оборудования с ручным управлением.

Автоматизация получила доступ в мелкосерийное и даже в единичное производство (при условии повторяемости деталей в различных изделиях) с созданием станков и промышленных роботов с ЧПУ. Станок с ЧПУ является автоматом с гибкой системой управления, работой которого управляет специализированный компьютер. Программа обработки детали на этом станке записывается в числовых кодированных командах на программоноситель (перфоленту, магнитную ленту или дискету) или вводится с клавиатуры пульта управления в память устройства ЧПУ, с помощью которого и реализуется. При этом точность задания размеров зависит не от свойств программоносителя, а от разрешающей системы ЧПУ и станка. Станок с ЧПУ не требует длительной переналадки при переходе на обработку новой детали. Для этого достаточно сменить программоноситель или ввести с пульта тем или иным способом новую управляющую программу, сменить режущий инструмент и, при необходимости, приспособления. Работая в автоматическом цикле, станок с ЧПУ сохраняет гибкость универсального станка с ручным управлением.

С внедрением станков с ЧПУ улучшаются технические и экономические показатели выполнения операций механической обработки в условиях мелкосерийного и серийного производства. Если при использовании станков с ручным управлением рабочий получает чертеж детали и затем выполняет все необходимые переходы и приемы, входящие в операцию, используются только его опыт и знания в пределах восприятия чертежа и технологической документации, то применение станков с ЧПУ предполагает предварительную подробную разработку содержания операции с применением средств вычислительной техники и учетом обобщенного опыта изготовления деталей, накопленного в промышленности.

Результаты работы на станке с ручным управлением в значительной степени зависят от знаний и навыков рабочего-оператора, а также от таких субъективных факторов, как быстрота его реакции и степень

усталости. Станки с ЧПУ позволяют исключить влияние человеческого фактора на производительность и качество обработки.

На основании опыта эксплуатации станков с ЧПУ установлено, что экономия на трудозатратах достигает 25–80%, один станок с ЧПУ заменяет от трех до восьми обычных станков с ручным управлением. Увеличивается доля машинного времени, и повышается производительность труда в год на 50%, а общая длительность изготовления продукции уменьшается на 50–60%. Экономия на стоимости изготовления оснастки составляет 30–80%. Точность изготовления деталей возрастает в отдельных случаях в несколько раз, а количество и стоимость отдельных операций уменьшается в 4–8 раз. При этом резко сокращается количество занятых рабочих.

11.8. Технологические требования к конструкциям деталей, обрабатываемым на металлорежущих станках

Учет технологических требований к конструкции детали, обрабатываемой резанием, преследует цель снизить материалоемкость, трудоемкость и стоимость изготовления детали при одновременном обеспечении всех эксплуатационных требований. Общее из этих требований следующее: уменьшить протяженность обрабатываемых поверхностей для сокращения трудоемкости обработки; предусмотреть узкие допуски на размеры лишь для посадочных поверхностей, оставляя широкими допуски по 12–14 квалитетам для остальных размеров; повысить точность изготовления заготовок, так как при точных методах выполнения заготовок объем механической обработки может быть сокращен и суммарная стоимость изготовления детали может оказаться меньше даже при увеличении стоимости заготовительных операций; предусмотреть удобные и надежные базирующие поверхности для установки и закрепления заготовок в процессе обработки, а также свободный провод режущих инструментов к обрабатываемым поверхностям; обеспечить свободный выход инструмента при обработке на проход (рис. 11.18, а) и сократить путь резания инструмента; предусмотреть возможность удобного контроля заданных размеров.

Технологические требования к оформлению отдельных простейших по форме элементов деталей следующие: отделить проточками, канавками, уступами (рис. 11.18, б) наружные и внутренние поверхности вращения, подвергаемые различным методам обработки; обеспечить фаски для облегчения сборки (рис. 11.18, в); предусмотреть сквозные отверстия, поскольку их обработка значительно легче; в глухих от-

верстиях оставить конус от сверла, зенкера или развертки (рис. 11.18, г); обеспечить перпендикулярность оси отверстий к поверхности входа и выхода сверла (рис. 11.18, д и з); сверлить диаметры отверстий в пазах меньше ширины паза, что исключает последующую зачистку граней (рис. 11.18, е); обрабатывать плоскости на проход (рис.11.18, е);

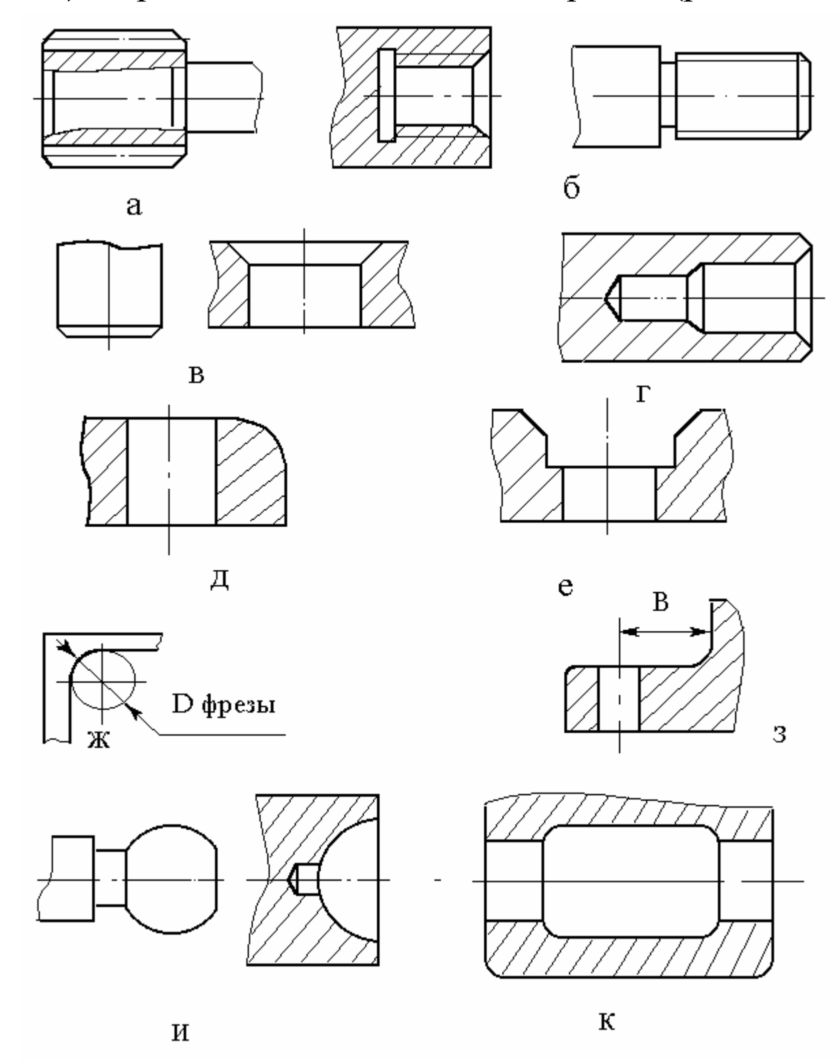


Рис. 11.18. Конструкции деталей, отвечающие требованиям технологичности при обработке резанием

предусмотреть на поверхностях с резьбой фаску в месте начала резьбы и канавку или место сбега резьбы (рис. 11.18, б) в конце резьбы; обрабатывать плоскости на проход (в случае, когда необходимо обрабатывать внутреннюю полость с сопряжением поверхностей по радиусу, размер радиуса перехода должен соответствовать радиусу фрезы – рис. 11.18, ж); обеспечить переход сферических наружных поверхностей в плоскую площадку, перпендикулярную оси вращения детали, а внутренних – в центровочное отверстие (рис. 11.18, и); предусмотреть

при обработке длинного точного отверстия технологическое расширение – расточку в середине этого отверстия (рис. 11.18, к).

11.9. Шлифование и доводка деталей

Шлифование относится к операциям окончательной (чистовой) обработки. В приборостроении применяется несколько видов шлифования: обработка наружных и внутренних цилиндрических и конических поверхностей, плоскостей, различных фасонных поверхностей

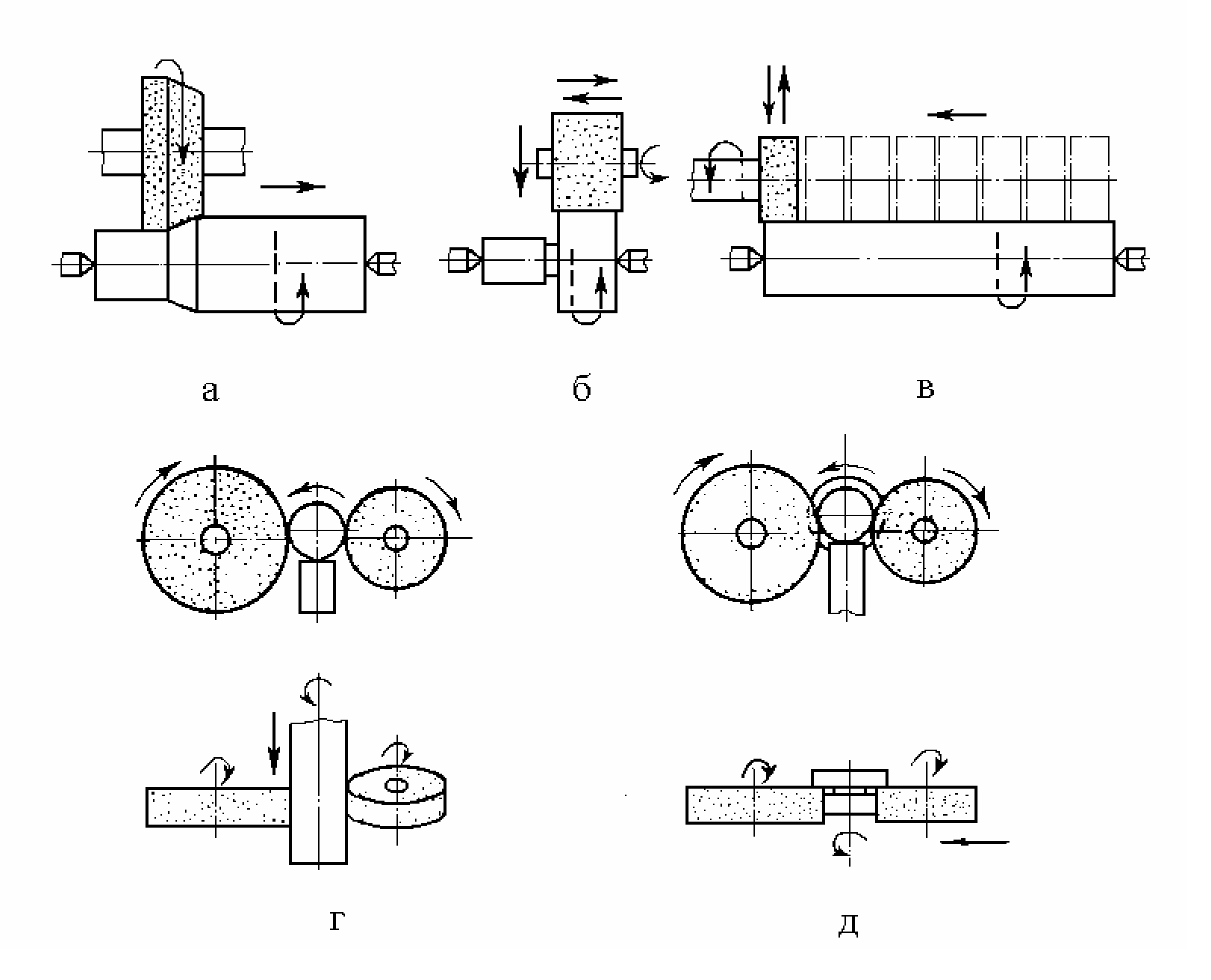


Рис. 11.19. Схемы обработки деталей на круглошлифовальных станках: а – глубинный метод, б – метод врезания, в – шлифование уступами, г, д – бесцентровое наружное шлифование

(например, поверхностей зубцов, шариков, сферических поверхностей колец подшипников и т.д.). Принципиальные схемы обработки деталей в типовых операциях шлифования представлены на рис. 11.19 и рис. 11.20.

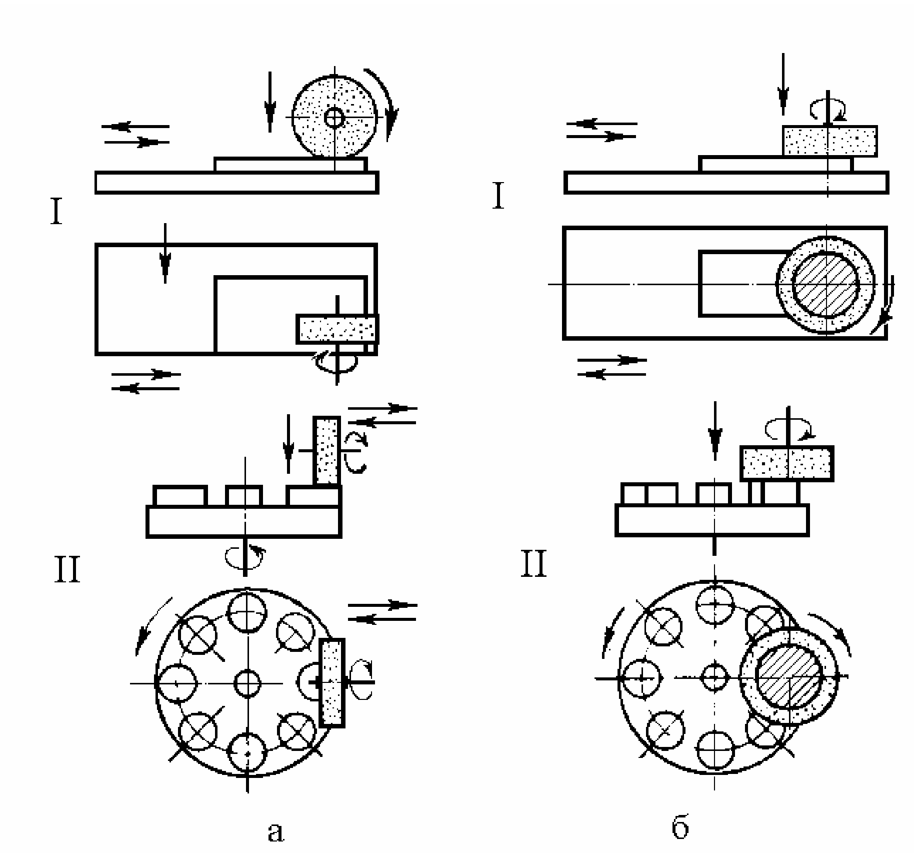


Рис. 11. 20. Схемы обработки деталей на плоскошлифовальных станках: а – шлифование периферией круга на станках с прямоугольным столом I и с круглым столом II, б – шлифование торцом круга на станках с прямоугольным столом I и с круглым столом II

11.10. Основные характеристики процесса шлифования

Шлифование представляет собой процесс скоростного резания, осуществляемого массой абразивных зерен, расположенных по периферии или торцовой поверхности шлифовального круга. Результатом резания отдельного абразивного зерна шлифовального круга, удаляющего мелкую стружку, является царапина на обрабатываемой поверхности. Поэтому процесс резания при шлифовании можно рассматривать как суммарное царапание (срезание) обрабатываемой поверхности абразивными зернами. Свойственная процессу шлифования малая шероховатость обрабатываемой поверхности достигается из-за наличия на поверхности инструмента огромного числа царапающих зерен, благодаря чему царапины не только плотно размещены, но и многократно перекрываются. Процесс резания при шлифовании отличается следующими особенностями:

1) шлифовальный круг имеет не сплошную, а прерывистую режущую кромку, так как абразивные зерна находятся друг от друга на некотором расстоянии;

2) процесс шлифования заключается в очень тонком срезании отдельными зернами (резцами) материала заготовки;

3) зерна круга в отличие от резцов имеют неправильную (округлую в вершинах) геометрическую форму и произвольно расположены в круге, поэтому передний угол имеет, как правило, отрицательное значение. Так у зерен электрокорунда зернистостью 80 имеются закругления на вершинах радиусом до 0,014 мм, а у зерен зернистостью 40– 0,012 мм. В момент, предшествующий резанию, абразивные зерна интенсивно скользят по металлу, вызывая большое тепловыделение, приводящее к высокой мгновенной температуре;

4) в процессе шлифования под влиянием увеличивающейся нагрузки, затупившиеся зерна выкрашиваются, или раскалываются, при этом обнажаются новые острые кромки зерен, т.е. в отличие от резца круги могут самозатачиваться;

5) снятие стружки зерном происходит за очень незначительное время (0,0001–0,00005 с), т.е. практически мгновенно, но благодаря большому количеству зерен процесс стружкообразования протекает для всего круга непрерывно;

6) высокая твердость и термостойкость абразивных зерен, а также увеличение пластичности обрабатываемого материала из-за местного нагрева в зоне контакта круга с деталью дают возможность обрабатывать очень твердые материалы (стальные закаленные детали, твердые сплавы и др.);

7) высокая температура в зоне контакта абразивного зерна и обрабатываемой детали приводит к интенсивному нагреву поверхности образовавшейся царапины; после выхода зерна из зоны контакта начинается охлаждение, но поверхность не успевает полностью охладиться до того, когда в работу вступает новое зерно. Можно считать, что новое зерно начинает резание при температуре примерно 600°С.

При высоких температурах материал имеет меньшую твердость и прочность, и поэтому обрабатывать его легче, чем холодный.

Ряд легирующих элементов способствует сохранению высоких механических свойств в нагретом состоянии, т.е. делают сталь жаропрочной. Наиболее эффективными элементами, повышающими жаропрочность, являются вольфрам, молибден, кремний, титан. Поэтому стали, легированные ими, шлифуются труднее углеродистых конструкционных сталей. Легирование конструкционных сталей добавками

хрома, марганца и никеля незначительно ухудшает обрабатываемость стали шлифованием.

Стружка, снимаемая при шлифовании размещаемая в порах шлифовального круга, при выходе из зоны шлифования под действием центробежных сил и струи охлаждающей жидкости удаляется с поверхности круга. При больших сечениях снимаемой стружки, превышающих размер пор между зернами круга, она вдавливается в поры круга с такой силой, что действие силы струи охлаждающей жидкости уже недостаточны, чтобы ее удалить. Такой режим шлифования ведет к быстрому «засаливанию» круга.

11.11. Режимы шлифования

Скорость шлифования. Скорость резания при шлифовании v_k – окружная скорость периферийных зерен круга, измеряемая в метрах за 1 с, представляет собой длину пути, которую проходит любая точка круга, находящаяся на его наибольшем диаметре D_k за 1 с.

Производительность шлифования возрастает приблизительно прямо пропорционально скорости круга. Чем больше скорость абразивного круга, тем меньше сечение стружки. Для уменьшения износа круга при большой скорости обрабатываемой детали и большой глубине шлифования нужно повышать скорость круга; при обработке нежестких деталей для уменьшения толщины стружки, а, следовательно, и нагрузки на круг и деталь, скорость необходимо увеличивать.

При шлифовании круг изнашивается и правится, поэтому диаметр круга D_k уменьшается. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению скорости шлифования, если частота вращения круга n_k остается постоянной.

Скорость детали (круговая подача). Скорость детали v_d – это путь, пройденный точкой шлифуемой поверхности за минуту. Скорость v_d определяется по формуле

$$v_{.d} = c_v d_d^{\rho} / \left(T^m t^x s^y\right), \qquad (11.4)$$

где c_v – коэффициент, зависящий от материала детали, ее термообработки и шлифовального круга; d_d^{ρ} – диаметр обрабатываемой поверхности, мм; T – стойкость круга, мин; t – глубина шлифования, мм; S – продольная подача мм/ об; ρ, m, x, y – показатели степени. Значения c_v, ρ, m, x, y приводятся в справочнике [10]. Скорость детали можно определять по режимам шлифования.

Получив расчетное значение v_d, находят соответствующую частоту вращения детали: $n_d = (1000v_d)/(\pi d_d)$. По паспорту станка выбирают ближайшее меньшее число оборотов $n_{ст}$ и на этих оборотах ведут обработку.

Глубина шлифования (поперечная подача). При черновом шлифовании выгодно работать с наибольшей глубиной резания (шлифования), допускаемой зерном круга, деталью и станком. При этом глубина резания не должна превышать половины поперечного размера зерна. Так, для круга зернистостью 50 она должна быть менее 0,25 мм.

При наружном шлифовании поперечная подача принимается для чернового шлифования 0,01–0,06 мм/дв. ход стола, а для чистового – 0,0025–0,01 мм/дв. ход.

Продольная подача. Продольная подача $S_{пр}$ измеряется в долях ширины круга. Для чернового круглого шлифования она составляет 0,4–0,85 ширины В круга за один оборот детали. При чистовых работах подача колеблется от 0,2 до 0,4 В за один оборот детали. Наиболее рациональные режимы резания выбираются по нормативам, приводимым в справочниках по режимам резания.

11.12. Абразивная доводка

К числу отделочных операций при механической обработке деталей приборов могут быть отнесены следующие виды абразивной обработки: хонингование (притирочное шлифование), отделочное шлифование (суперфиниш), притирка и полирование [10].

Суперфиниш. Обработка различной формы поверхностей деталей этим методом выполняется с помощью специальных приспособлений, несущих несколько мелкозернистых абразивных брусочков, которые прижимаются к обрабатываемой поверхности и дополнительно получают частые пульсирующие возвратно-поступательные перемещения. Эти движения, накладываясь на основное движение обрабатываемой поверхности, обеспечивают такую обработку, когда зерна абразива не повторяют своего пути по обрабатываемой поверхности, за счет чего, главным образом, и достигается высокая степень точности обработки. При этом частично исправляется форма и обеспечивается шероховатость обработанной поверхности Ra = 0,080–0,040 мкм.

Хонингование. Хонингованием обрабатывают в основном цилиндрические отверстия как сквозные, так и глухие диаметром 2 мм и выше, длиной 10–20 мм. При этом исправляются погрешности формы поверхности от предшествующей обработки, уменьшается шерохова-

тость поверхности до Ra 0,63–0,04 мкм, и увеличивается несущая поверхность.

Притирка. Детали приборов не только шлифуют связанными абразивными зернами в виде круга или сегмента, но и доводят свободными абразивными зернами в виде суспензии абразива с маслом или в виде паст.

Особенность процесса состоит в том, что абразивные зерна (точнее, смесь зерен с компонентами пасты или смазывающе-охлаждающей жидкости) под воздействием притира снимают слой материала. Притир не только сообщает зернам необходимые движения и усилия, но и обеспечивает требуемую точность обработки поверхности. К числу общих признаков, характеризующих процесс абразивной доводки, относятся:

1) одновременное воздействие на поверхность детали большого числа режущих зерен, протекающее при относительно низких скоростях и давлениях;

2) применение мелкозернистых абразивов в виде микропорошков, тонких микропорошков, иногда шлифпорошков;

3) сложная кинематика (наличие нескольких движений притира и детали), создающая наиболее благоприятные условия для работы абразивных зерен, способствует повышению точности обработки и уменьшению шероховатости поверхности;

4) незначительная роль тепловых явлений и отсутствие связанных с ними структурных изменений в поверхностном слое металла.

Можно считать, что процесс доводки состоит из механических и химических явлений. Механические явления сводятся к резанию металла абразивными зернами с отделением мельчайших стружек либо к трению с изнашиванием обрабатываемой поверхности вследствие многократных пластических деформаций. Соотношение между процессами резания и трения определяется свойствами обрабатываемого материала, геометрией и физико-механическими свойствами абразивных зерен, рабочим давлением и скоростью резания при доводке. Доводка резанием более производительна, но дает шероховатую поверхность; доводка трением с изнашиванием, наоборот, менее производительна, но зато дает менее шероховатую поверхность. Тончайший поверхностный слой в результате доводки подвергается некоторому наклепу. Глубина наклепанного слоя в зависимости от условий доводки составляет 2–10 мкм, а степень наклепа – 10–30%.

Химические явления при доводке заключаются в чрезвычайно быстром (сотые доли секунды) образовании оксидных пленок и ад-

сорбционных слоев, которые затем удаляются движущимися абразивными зернами. При этом существенная роль принадлежит жидким компонентам, входящим в состав пасты или суспензии, их составу и химической активности. Жидкие компоненты в процессе доводки выполняют следующие функции:

1) подводят абразивные зерна в рабочую зону, равномерно распределяют их по поверхности притира и создают зазор между притиром и деталью, необходимый для размещения и движения абразивных зерен;

2) образуют поверхностные пленки и проникают в микротрещины обрабатываемого материала, что способствует его более интенсивному разрушению, т.е. повышает производительность доводки;

3) создают смазывающий слой, предохраняющий металлические поверхности детали и притира от непосредственного контакта, приводящего к их схватыванию и повреждению;

4) удаляют отходы – частицы металла и абразива;

5) охлаждают в процессе работы деталь и притир.

Образующийся на поверхности детали тончайший граничный слой смазки снижает режущее действие абразивных зерен и способствует получению менее шероховатой поверхности.

Абразивную доводку используют для получения высокой точности (допуски на размеры и отклонения от плоскостности, параллельности и цилиндричности составляют от 2–3 до 0,5–0,05 мкм) и малой шероховатости (Rz 0,8 – Rz 0,05) поверхности деталей. Целесообразно применение доводки при обработке тонких легко деформируемых деталей, а также при необходимости сохранения специальных свойств исходного материала, изменяющихся при значительных тепловых и силовых воздействиях, или удаления дефектного слоя металла, образовавшегося при предшествующей обработке, в частности, после шлифования. Наконец, методом взаимной доводки (притирки) прирабатывают друг к другу трущиеся и контактирующие поверхности деталей, работающие в паре, что обеспечивает высокую плотность прилегания и увеличение (до 95%) фактической поверхности контакта.

Доводка абразивом – процесс высокопроизводительный, так как в большинстве случаев в одном приспособлении одновременно обрабатываются партии деталей от трех – четырех до нескольких десятков штук.

Контрольные вопросы

1. Назовите общий признак для всех способов резания.
2. Приведите схемы стружкообразования при резании материалов различной твердости.
3. Перечислите основные виды токарной обработки. Изобразите схемы обработки, формы и название инструмента.
4. Какие работы можно выполнить на фрезерных станках? Типы фрезерных станков. Изобразите схемы обработки, формы и название фрез.
5. Геометрия резца. Его основные элементы.
6. Режимы резания. Как зависит точность изготовления и качество поверхности обрабатываемой детали от режимов резания?
7. Силы резания при точении. Какие факторы влияют на значения сил резания?
8. В чем заключаются основные требования к инструментальным материалам?
9. Каковы основные группы инструментальных материалов?
10. В чём отличие притирки от шлифования?
11. Какие технологические требования предъявляются к конструкциям деталей, обрабатываемых на металлорежущих станках?
12. Назначение и сущность хонингования.
13. Как зависит стоимость детали от точности обработки?
14. Укажите достижимую точность размеров, шероховатость поверхности и глубину дефектного слоя при черновом, чистовом и тонком точении, фрезеровании и строгании.

XII. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ И ПЛАСТМАСС

12.1. Изготовление деталей из металлических порошков

Производство изделий из металлических порошков относится к отрасли техники, называемой порошковой металлургией.

Из металлических порошков можно получить детали с особыми физико-механическими свойствами; детали, не требующие дополнительной обработки; чистые металлы и сплавы заданного химического состава; детали из тугоплавких металлов и сплавов, композиции из металлов и неметаллов и др.

В приборостроении для изготовления деталей могут быть использованы металлические порошки, получаемые различными методами, например, вихревым измельчением металлов и сплавов. Порошки получают также из металлов и сплавов распылением в специальных аппаратах сжатым воздухом или водой под давлением 200–600 кПа.

Для изготовления контактных щеток, магнитов, пористых подшипников и т.п. используется электролиз различных водных растворов с последующей промывкой, сушкой, измельчением и просеиванием осадка, затем выполняется прессование, спекание и калибрование порошковых изделий в специальных пресс-формах. Детали прессуются в постоянных или съемных пресс-формах на гидравлических или механических (эксцентриковых, кривошипных и т.д.) прессах среднего и высокого давления.

Представляет большой интерес прогрессивный метод порошковой металлургии: горячее изостатическое прессование и инжекционное формование [14].

Первый из методов состоит в том, что исходный порошок помещают в форму, имеющую конфигурацию будущего изделия. Форму устанавливают в автоклав, в котором создается высокое давление и высокая температура инертного газа. Материалом для формы может служить стекло, керамика, листовая сталь в зависимости от сложности конфигурации формуемого изделия. Температура нагрева формы с порошком определяется составом последнего и обычно выдерживается на уровне 1260°С с точностью ±1 %. Давление газа в автоклаве составляет обычно 68,6–102,9 МПа. Перед помещением в печь в форме с порошком понижается давление до $9{,}8\times10^{-3}$ Па для предотвращения окисления порошка. Средняя длительность всего цикла в производственных условиях 30 мин. Изделие имеет высокую плотность, равную примерно плотности

металла, обработанного давлением. Метод изостатического прессования применим для самых различных материалов (сплавов никеля, титана, алюминия, бериллия, свинца и др.). Метод дает большую экономию материала. Например, титановую деталь массой 0,18 кг методом изостатического прессования получают из заготовки массой 0,45 кг, тогда как для изготовления этой детали обычными методами порошковой металлургии требуется заготовка массой 2,2 кг.

При втором методе инжекционном формовании приготовляют шликер. В состав шликера входят металлические и керамические порошки, а также связка. Шликер вдувается в форму под давлением 137 МПа при температуре 135–204°С. Процесс формования длится 10–90 с. Связка из сформованных деталей удаляется высушиванием, после чего осуществляется их спекание.

Для формования по этому методу требуется более измельченный порошок, чем обычно. Процесс обеспечивает воспроизведение сложных форм (поднутрения, выточки, поперечные отверстия), равномерную плотность по сечению и точность порядка 0,3–0,5% от размера детали. Наиболее удобно формовать детали с толщиной стенки 0,6–5 мм. Метод инжекционного прессования особенно эффективен для формования небольших (до 300 г) массой деталей сложной формы. Высокая производительность достигается при автоматическом прессовании (рис.12.1). Порошок из бункера 1 через рукав 2 попадает в пресс-форму 3. Положение нижнего пуансона 4 определяется количеством загружаемого порошка. После заполнения пресс-формы бункер с рукавом отходят в сторону и пуансон 5 прессует. Готовое изделие выталкивается пуансоном 4. Качество изделий зависит от шероховатости внутренних поверхностей пресс-формы и равномерности распределения порошка по объему детали. Спекание ведется в электрических или газовых печах. В качестве защитной среды используется водород, окись азота и др. В процессе спекания происходит усадка изделий в пределах 1–2% номинального размера.

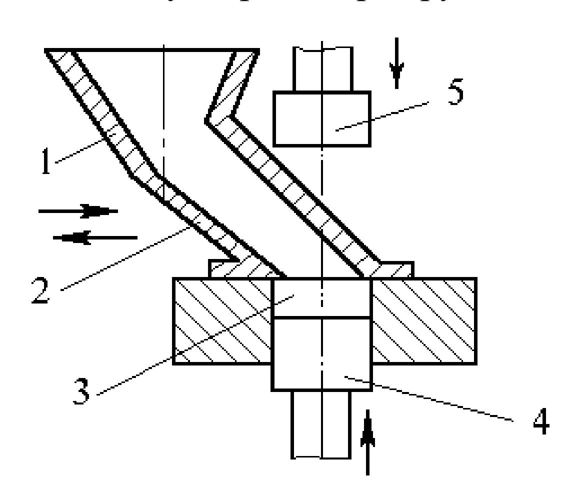


Рис. 12.1. Схема автоматического прессования из металлических порошков

Некоторые детали из твердых сплавов получают горячим прессованием, при котором операции обжатия и спекания совмещаются. До точных размеров детали доводятся калиброванием в специальных пресс-формах. Точность размеров и качество поверхностей детали после калибрования определяются точностью и шероховатостью поверхности калибровочного инструмента.

При необходимости повышения точности размеров порошковых изделий их можно обрабатывать резанием инструментами, оснащенными пластинами твердого сплава.

12.2 Изготовление деталей приборов из пластмасс

12.2.1. Общие положения

Пластмассы состоят из нескольких компонентов, основным из которых является полимер – высокомолекулярное органическое вещество (искусственная или естественная смола), выполняющая функцию связующего материала для всех основных компонентов. Помимо полимера в состав пластмассы входят наполнители, стабилизаторы, пластификаторы, смазки, красители, вспениватели и другие компоненты. Наполнители в виде кварцевой или древесной муки, молотой слюды, хлопчатобумажных или стеклянных волокон повышают ее прочность и уменьшают стоимость детали. Стабилизаторы предназначаются для замедления процессов старения пластмассы, т.е. изменения ее свойств под действием тепла, кислорода воздуха и световой энергии. Пластификаторы вводят для улучшения пластических свойств. Смазывающие вещества необходимы для увеличения подвижности исходного материала при формовании деталей.

В настоящее время насчитывается около 6000 марок пластмасс. Основное сырье для получения пластмасс широко распространено в природе – нефть, уголь, известь и др. В приборостроении пластмассы используются как конструкционные, так и электроизоляционные материалы. Пластмассы достаточно прочные и легкие материалы, имеющие плотность 0,9–2,2 г/ см^3. Некоторые пластмассы обладают уникальными свойствами, например, по химической стойкости политетрафторэтилен превосходит золото и платину, а ряд прозрачных пластмасс пропускают ультрафиолетовые лучи. Свойства некоторых электро- и радиотехнических пластмасс приведены в табл. 12.1.

Наряду с перечисленными выше ценными качествами пластмассы имеют и некоторые недостатки: небольшой диапазон рабочих температур от 333 до 473 К, а для некоторых видов пластмасс он ограничивает-

ся 353 К; низкая твердость от 60 до 600 МПа; изменение свойств (старение) под действием нагрузки, тепла, света и атмосферы.

Классификация пластмасс. Пластические массы, в зависимости от химической природы полимеров, используемых для их производства, разделяются на четыре класса.

Класс А. Пластические массы на основе высокомолекулярных соединений, получаемых цепной полимеризацией: полиэтилен ВД, полиэтилен НД, полипропилен, винипласт, пластикаты на основе поливинилхлорида, полиизобутилен, фторопласты, полистирол и его полимеры, этинопласты (поливинилбутираль и др.), асбовинил и др.

Таблица 12.1

Свойства некоторых электро- и радиотехнических пластмасс

Наименование марки пластмассы	Электрическая проницаемость при 50 Гц, кВ/мм (толщина образца 1 – 2 мм)	Диэлектрическая проницаемость при 10^6 Гц	Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 Гц
Полистирол	20 – 25	2,5 – 2,8	$(3-4)\cdot 10^{-4}$
Полиэтилен ВД	40	2,3 – 2,4	$(3-6)\cdot 10^{-4}$
Фторопласт – 4	40 – 80	1,9 – 2,2	$1\cdot 10^{-4}$
Пентапласт кабельный	24	3,2 (50 Гц)	0,035 (50 Гц)
Поли-4-метил-пентен	30	2,2	$(2-3)\cdot 10^{-4}$
Полиамиды	22 -29	3 - 3,2	$(1{,}5-6{,}6)\cdot 10^{-3}$

Класс Б. Пластические массы на основе полимеров, получаемых поликонденсацией и ступенчатой полимеризацией: фенопласты с разными наполнителями (пресс-порошки, волокниты, текстолиты, стеклотекстолиты и др.), аминопласты, мелалит, анилинопласт, эфиропласты, полиамиды (капрон и др.), уретанопласты, композиции на основе кремнийорганических смол (силиконопласты), эпоксипласты и др.

Класс В. Пластические массы на основе химически модифицированных природных полимеров. К ним относятся пластические массы на основе производных целлюлозы (целлулоид, этролы различных марок и др.), а также протеинопласты.

Класс Г. Пластические массы на основе природных и нефтяных асфальтов и смол: битумопласты с различными наполнителями.

Кроме того, по технологической классификации пластмассы делятся на две основные группы: термопластичные и термореактивные.

К термопластичным пластмассам относятся все пластмассы класса А, В и Г, частично класса Б (полистирол, полиэтилен, винипласт, капрон и др.)

К термореактивным относятся большинство пластмасс класса Б (фенопласты, аминопласты, эфиропласты, эпоксипласты, силиконопласты и др.).

Выбор методов изготовления пластмассовых деталей и назначение режимов выполнения операций проводится с учетом технологических свойств материалов: текучести, времени отверждения, усадки после отверждения и таблетируемости. При использовании таблетируемого материала уменьшаются потери сырья и улучшаются производственные условия.

12.2.2. Технологические методы достижения заданных физических свойств, точности размеров и качества поверхности деталей из пластмасс

Выбор марки пластмассы в качестве конструкционного материала ведется с учетом назначения и условий эксплуатации детали, физических свойств пластмассы и ее стоимости. Для деталей конструктивной базы приборов важным свойством являются пределы прочности при растяжении, сжатии и изгибе, относительное удлинение, ударная вязкость и рабочий температурный диапазон. Детали схемотехнической базы, наряду с необходимой механической прочностью, должны обладать электрической прочностью, достаточным объемным и поверхностным электросопротивлением, диэлектрической проницаемостью и допустимым тангенсом угла диэлектрических потерь.

Кроме того, формирование заданных свойств и точности размеров деталей достигается подбором методов и режимов переработки, условиями заполнения формы пресс-материалом или расплавом. Например, графики (рис. 12.2, а) показывают, что ударная вязкость деталей из полиметилметакрилата очень чувствительна к температуре $T_р$ расплава и температуре $T_ф$ формы при формообразовании, а прочность σ этого же материала зависит от давления $T_ф$ в полости пресс-формы и величины $T_р$ (рис. 12.2, б).

Шероховатость поверхности пластмассовых деталей зависит от шероховатости поверхностей формы и находится в пределах R_a 2,5–

R_a 0,32 (при шероховатости поверхности формы R_a 0,16–R_a 0,63).

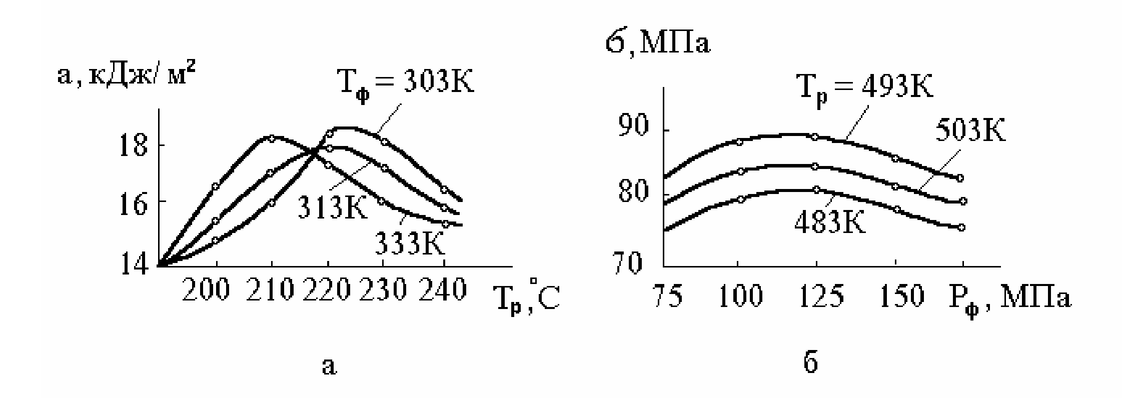


Рис. 12.2. Зависимость физических свойств пластмасс от режимов обработки

12.2.3. Общая структура, точность, производительность и экономическая эффективность технологических процессов изготовления деталей приборов из пластмасс

Первичным фактором, определяющим структуру технологического процесса изготовления пластмассовой детали, является выбор конкретной марки пластмассы, который осуществляется из условий полного удовлетворения требованиям, предъявляемых детали, исходя из ее служебных функций, условий эксплуатации и экономичности изготовления. В свою очередь, состав и вид пластмассы, сложность формы и габариты детали, а также формируемые свойства детали обусловливают выбор метода формообразования. Принадлежность марки пластмассы к термопластам или к реактопластам и выбранный метод формообразования однозначно определяют структуру технологического процесса.

На рис. 12.3 и рис. 12.4 стрелками показана последовательность выполнения операций типовых технологических процессов для термопластов и реактопластов. Технологические процессы, имеющие общность физико-химических процессов, сопровождающих операцию формообразования детали, имеют одну и ту же структуру. Так, технологические процессы (ТП) с такими формообразующими операциями **первой группы,** как литье под давлением, прессование и выдувание термопластичных пластмасс, имеют типовую структуру, состоящую из следующих этапов: смешивание полимера и других компонентов исходной композиции, гранулирование, формообразование, выполнение операций доработки деталей. Формообразование деталей в этих процессах осуществляется посредством деформации полимеров, находя-

щихся в вязкотекучем состоянии, с последующим охлаждением. В качестве исходного сырья для формообразования используются гранулированные композиции на основе термопластичных полимеров. В отдельных случаях применяют порошкообразные композиции. **Второй тип** ТП с формообразующими процессами напыления, ротационного формования, спекания и окунания термопластов основывается на диффузионно-адгезионных процессах. Исходным сырьем для процессов служат порошкообразные массы и пасты.

Третий тип ТП характерен формообразованием деталей или полуфабрикатов из растворов. Для **четвертого типа** ТП обязательно вспенивание полимера при смешивании с компонентами и протекание процессов полимеризации мономеров или жидких форполимеров в формах. Для всех процессов **пятой группы** характерным является смешивание мономера с инициатором или катализатором, последующая заливка жидкой композиции в форму, где вследствие химической реакции происходит образование полимера. Уникальной технологической особенностью полимеризации при нагреве листовых и пленочных термопластичных материалов в формах является возможность получения деталей с толщиной стенок без ограничения в большую сторону.

Для ТП **шестой группы** характерны процессы рекристаллизации при нагреве листовых и пленочных материалов перед формообразованием и пластические деформации растяжения при формообразовании. Типовые процессы для **седьмой, восьмой и девятой групп** формообразования деталей из реактопластов позволяют изготавливать детали из композиционных порошковых пресс-материалов или из отдельных компонентов (жидких полимеров, наполнителей, армирующих материалов). Во всех типовых процессах **седьмой группы** (рис. 12.4) формообразование деталей сопровождается течением пресс-материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, и химической реакцией отверждения связующего компонента, которая переводит исходный материал в неплавкое и нерастворимое состояние.

В процессах **восьмой группы** формообразование деталей или исходных заготовок осуществляется в результате придания нужной формы формирующим материалам, пропитки этих материалов и протекания химических реакции отверждения при воздействии температуры и давления. Характерной особенностью процессов **девятой группы** является то, что процесс формообразования, парообразования и химическая реакция отверждения протекают одновременно.

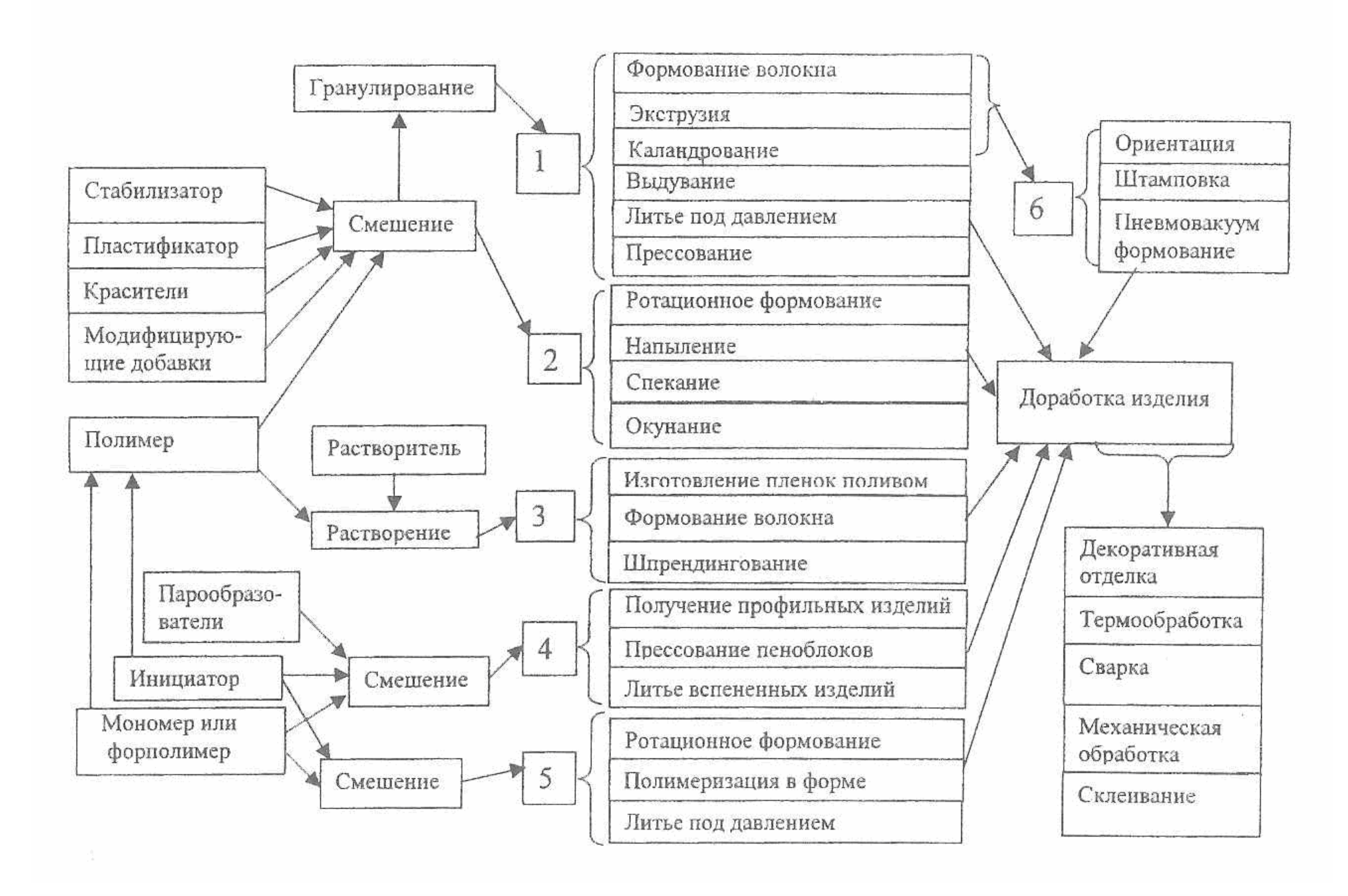


Рис. 12.3. Последовательность операций типовых технологических процессов для термопластов и реактопластов

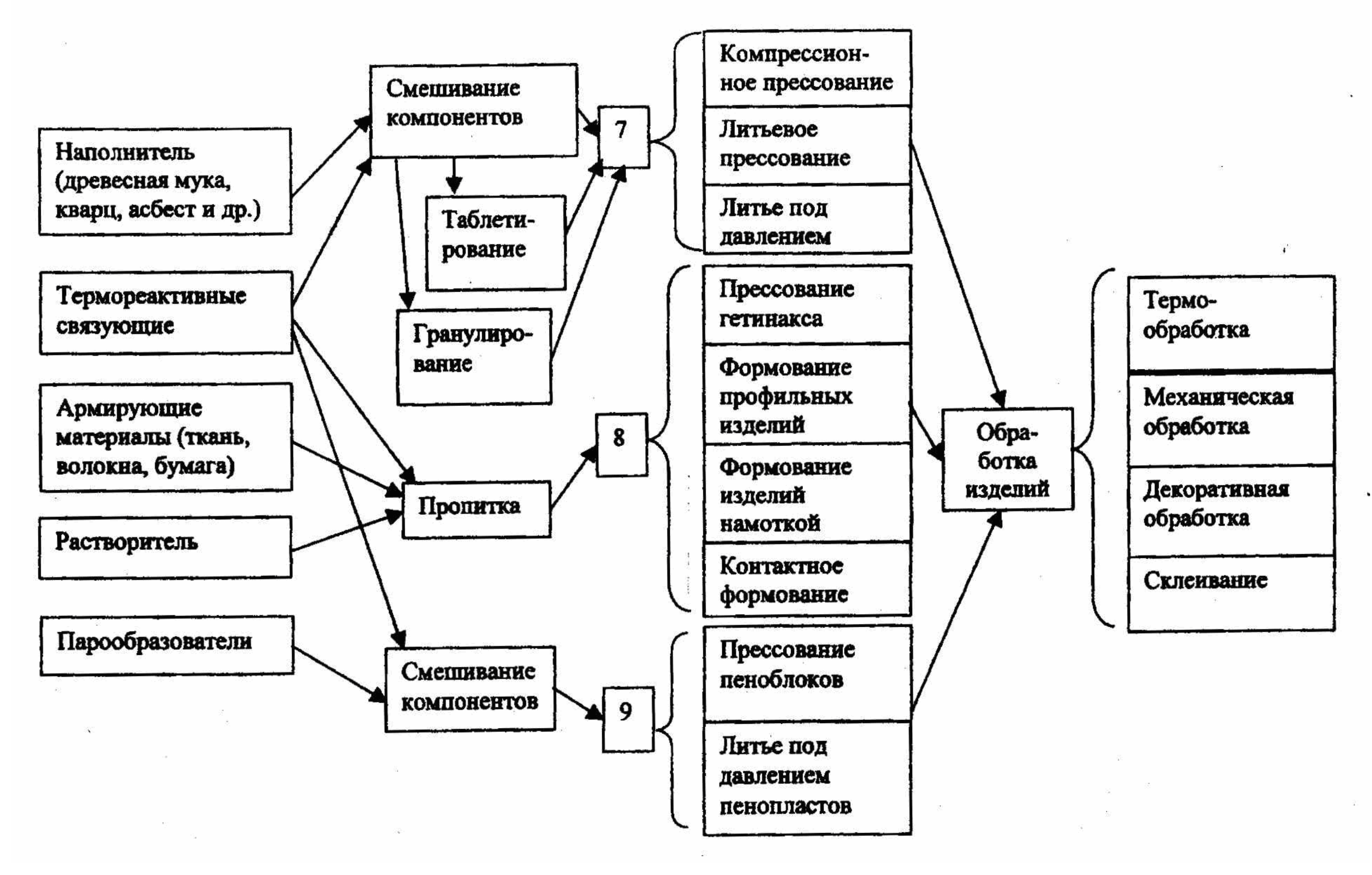


Рис. 12.4. Последовательность выполнения технологических операций при изготовлении изделий из пластмасс

Последний этап технологического процесса изготовления пластмассовых деталей - их доработка. Доработку деталей используют по мере надобности. Содержание методов доработки для термопластов и реактопластов имеет некоторое отличие.

Точность размеров разных элементов одной и той же детали может быть выдержана неодинаково. Она зависит от направления течения расплава при заполнении полости формы, от разброса усадки материала при отверждении, вызванного отклонениями режимов переработки от заданных, а также условиями и временем хранения гранул или пресс-порошка перед переработкой.

На рис. 12.5 показана зависимость изменения усадки от времени отверждения и температуры прессования [14]: 1 – усадка в направлении, перпендикулярном течению; 2 – усадка вдоль направления течения.

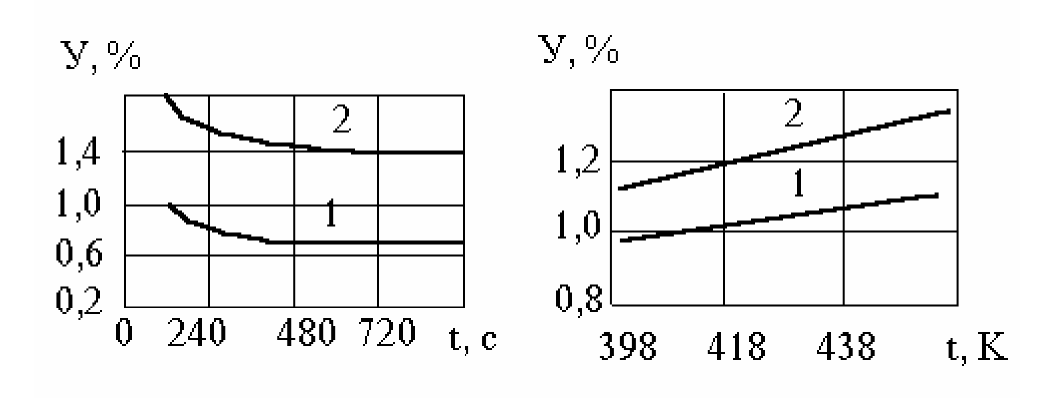


Рис. 12.5. Зависимость изменения усадки от времени отверждения и температуры прессования

Кроме того, на точность получаемых размеров детали влияют: точность изготовления формирующих элементов матриц и знаков, зазоры между перемещающимися частями пресс-формы и относительная нестабильность положения этих частей после смыкания пресс-формы. Различают три типа размеров по признаку их связи с перечисленными факторами (рис. 12.6). Точность размеров типа A_1 зависит только от погрешностей изготовления формирующих элементов пресс-формы. На точность размеров A_2 и A_3 совместно влияют погрешности изготовления формирующих элементов пресс-формы и нестабильность положения этих элементов, вызванная зазорами в соединениях пресс-формы. Достижимые квалитеты точности для размеров A_1, A_2 и A_3 в зависимости от колебаний усадки приведены в табл. 12. 2.

Переработка пластмасс в детали высокопроизводительна и экономична даже для сложных по форме деталей по сравнению с трудоемкостью изготовления другими методами. Например, корпус магнитофона из пластмассы изготавливают полностью с удалением литников и отделочной зачисткой следов от литников за 2 минуты. Эффективность использования материала составляет 0,98. Если такой же корпус делать из металла обработкой резанием, то коэффициент использования материала будет 0,2, а трудоемкость изготовления возрастет в несколько десятков раз.

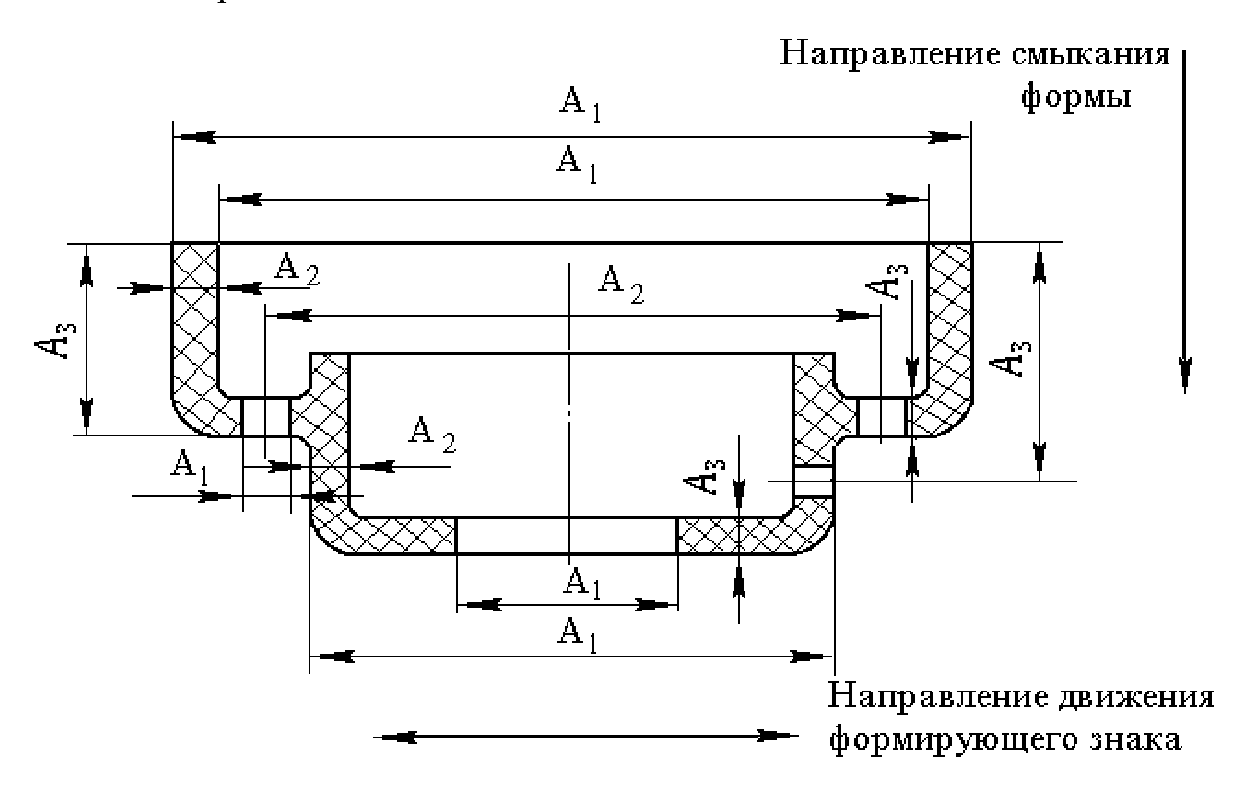


Рис. 12.6. Характерные типы размеров пластмассовых деталей

При полной автоматизации процессов изготовления пластмассовых деталей в условиях крупносерийного производства производительность линий оборудования достигает до 10 тыс. штук в смену. Экономическая эффективность изготовления пластмассовых деталей обусловлена низкой трудоемкостью и малой стоимостью переработки пластмасс в детали по сравнению с металлом (табл. 12. 3).

Таблица 12.2

Квалитеты точности для размеров пластмассовых деталей в зависимости от колебаний усадки

Интервалы размеров, мм	Колебания усадки в %							
	до 0,06	0,1	0,16	0,25	0,4	0,6	1,0	более 1,0
Квалитеты точности для размеров типа A_1 (см. рис. 3. 24)								
до 3	8	9	10	11	12	13	14	15
3 - 30	8	9	10	11	12	13	14	15
30 - 120	8	10	11	12	13	14	15	16
120 - 250	10	11	12	13	14	15	16	17
250 - 500	11	12	13	14	15	16	17	18
Квалитеты точности для размеров типа А 2 и А3 (см. рис. 3. 24)								
до 3	10	11	12	13	14	15	16	17
3 -30	9	10	11	12	13	14	15	16
30 -120	10	11	12	13	14	15	16	17
120 -250	11	12	13	14	15	16	17	18
250 -500	12	13	14	15	16	17	18	-

Таблица 12.3

Основные составляющие расходов при производстве пластмассовых деталей

Составляющие расходов	Марка пластмассы				
	Полиамид П - 610	Ударнопрочный полистирол	Стекло - пластик АГ - 4В	АТМ - 2	Латунь ЛС-59-1 для сравнения
Стоимость тонны материала, условные единицы	1300	900	2800	700 - 1300	500
Себестоимость переработки тонны материала, условные единицы	4400	4400	2390	1300	9800

12.2.4. Содержание технологических процессов в зависимости от использования методов изготовления деталей приборов из пластмасс

При изготовлении деталей из пластмасс наибольшее применение находят типовые процессы, в которых используются методы литья под давлением из гранулированного термопластичного (реже термореактивного) исходного сырья, формования деталей из листовых термопластичных материалов, прямого и литьевого прессования реактопластов (реже термопластов). Рассмотрим основные операции этих технологических процессов.

Операция литья под давлением термопластов состоит из следующих переходов:

- дозирование через бункер 5 (рис. 12.7), плавление и гомогенизация (достижение однородности) полимерного материала в цилиндре 3 литьевой машины 7;
- смыкание формы 1;
- подвод узла впрыска с соплом 2 и шнеком 4 к литниковому каналу формы;
- впрыск расплава в оформляющую полость формы при рабочем ходе поршня 6 узла впрыска;
- выдержка под давлением;
- отвод узла впрыска от формы 1 и извлечение детали 8 (рис. 12.7,б).

Основными параметрами режима выполнения операции являются: температура расплава в цилиндре машины, удельное давление расплава, температура формы, время выдержки под давлением, время охлаждения детали в форме. Температуру расплава выбирают с учетом реологических свойств и температуростойкости полимера, толщины стенок детали, площади поверхности детали, требований к физическим свойствам материала детали, температуры формы, а также в зависимости от размеров литниковых каналов. Так, для получения деталей с уменьшенной анизотропией свойств их материала применяется повышенная температура, а для получения деталей из того же материала, но с повышенной точностью в направлении течения расплава, температура расплава должна быть по возможности минимальной.

Удельное давление в форме влияет на размеры деталей через изменение усадки материала при охлаждении. Численное значение оптимальных значений температур расплава и давления в оформляющей полости формы приводятся в справочниках с указанием усадки. Время

выдержки под давлением зависит от толщины стенок и назначается из условия того, что температура расплава в центральной части литника понижается до температуры текучести. Время выдержки при охлаждении должно быть достаточным для того, чтобы деталь достигла определенной прочности, исключающей необратимую деформацию детали при извлечении последней из формы. Численное значение времени выдержки зависит от скорости кристаллизации полимера или скорости перехода в стеклообразное состояние некристаллизующихся полимеров, от температуры формы.

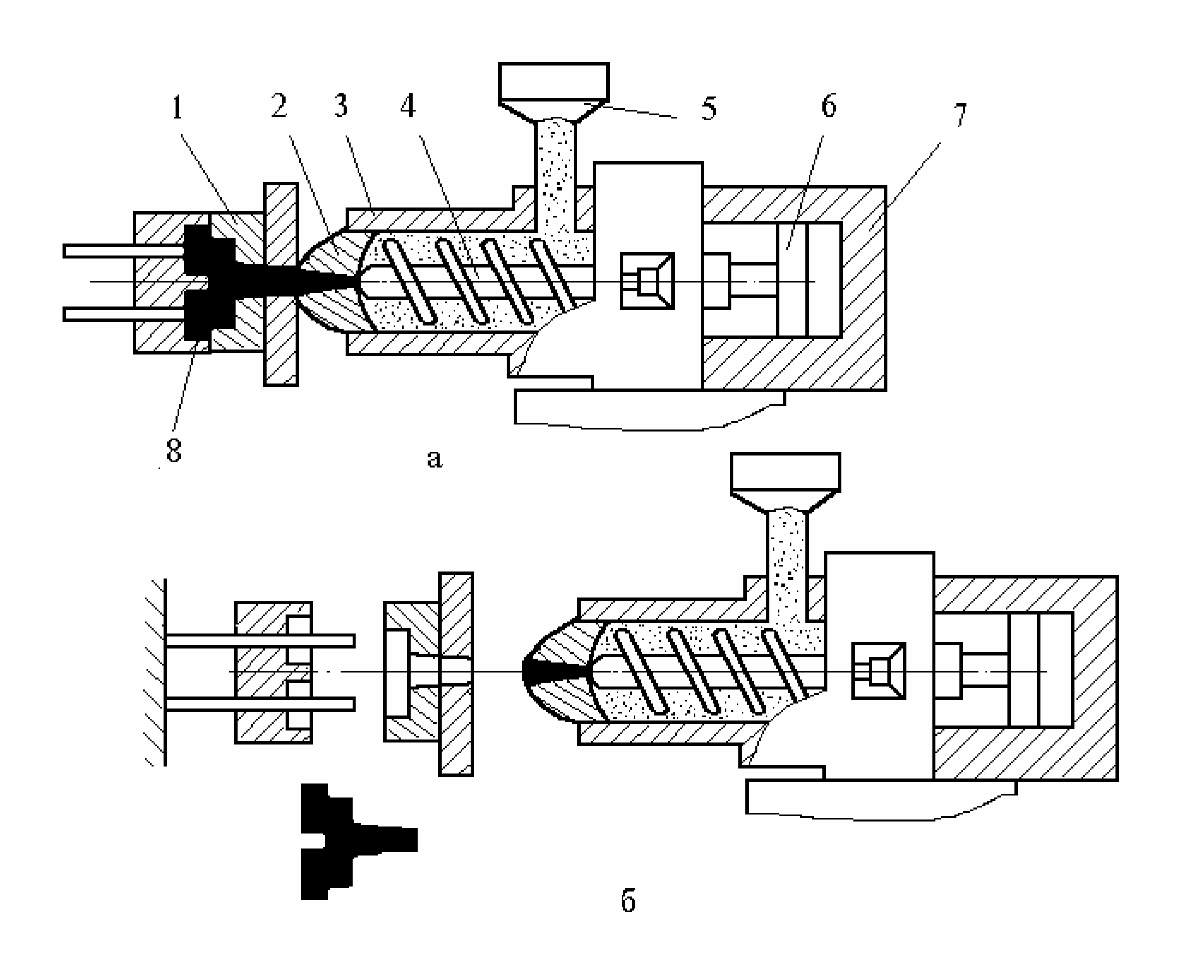


Рис. 12.7 Схема литья термопластов под давлением

Операцию литья под давлением выполняют на литьевых машинах. Производительность $Q_п$ узла пластикации выбранной литьевой машины должна быть:

$$Q > (nG_{изд} + G_л) / (t_{охл} + t_р), \quad (12.1)$$

где $G_{изд}$ и $G_{л}$ – масса изделий и литников; n – гнездность формы; $t_{охл}$ и $t_{р}$ – время охлаждения и закрытия формы.

Другим важным параметром литьевой машины является усилие P смыкания формы. Для исключения раскрытия формы в момент заполнения ее расплавом, оно должно быть

$$P_{см} > P_{ф}(F_{изд}\, n + F_{л}), \qquad (12.2)$$

где $P_{ф}$ – давление в форме; $F_{изд}$ и $F_{л}$ – площади изделий и литников в полости формы.

Операция формирования деталей из листовых термопластов

Формирование детали осуществляется под действием тепла и нагрузки (усилия пресса, сжатого воздуха или вакуума). Операция формирования состоит из переходов:

- закрепление листовой заготовки 3 в зажимной раме 2 (рис. 12.8, а);
- нагревание заготовки инфракрасным нагревателем 1 или в сушильных шкафах, или в электрическом поле высокой частоты (для полярных полимеров);
- предварительная вытяжка (только для глубоких деталей, рис. 12.8, б);
- формование (рис. 12.8, в) с использованием вакуума на пуансоне 4, установленном на плате 5);
- охлаждение;
- вырубка по контуру;
- извлечение (рис. 12.8, г).

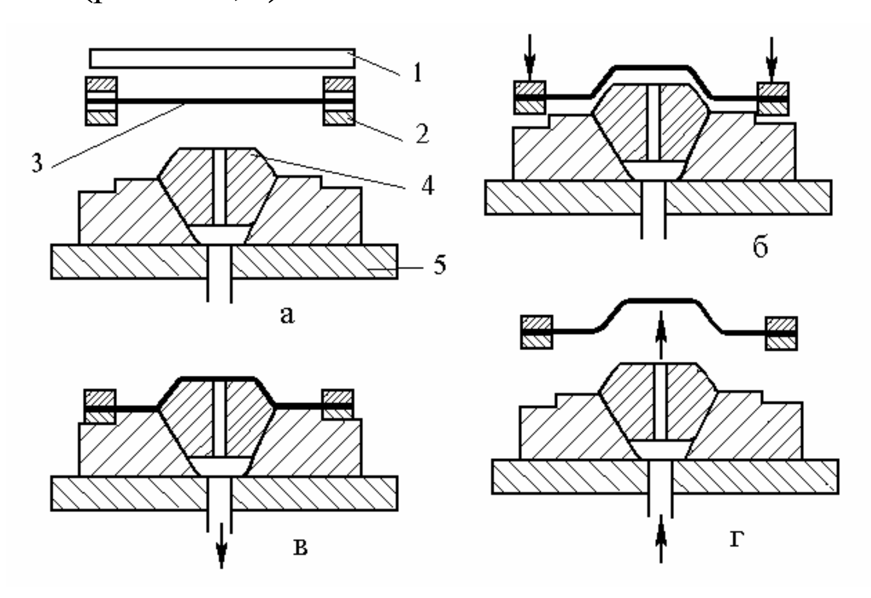


Рис. 12.8. Схема формирования деталей из листовых термопластов

Параметры режима формования следующие: температура формования; усилие формования (или степень вакуума, или давление сжатого воздуха).

Операции компрессионного (прямого) и литьевого прессования термопластов. При компрессионном (прямом) прессовании (рис. 12.9, а) предварительно нагретый пресс-материал 2 загружают в матрицу 3 формы, имеющей рабочую температуру прессования, затем части формы, имеющей рабочую температуру прессования, затем части формы 1 и 3 смыкаются, и пресс-материал выдерживается под давлением. Отверждение пресс-материала в форме происходит без охлаждения.

Операция компрессионного прессования состоит из следующих переходов:

- загрузка предварительно нагретого пресс-материала в оформляющую полость формы;
- смыкание формы;
- прессовка;
- выдержка под давлением;
- размыкание формы;
- извлечение прессованной детали из формы выталкивателями 4 (рис.12.9, а);
- очистка формы.

Литьевое прессование (рис. 12.9, б) отличается от компрессионного тем, что пресс-материал загружается не в формообразующую полость формы, а в специальную загрузочную камеру 6, соединенную с оформляющей полостью 4 литниковыми каналами 9, по которым поступает размягченный пресс-материал 8 под давлением; канал 3 – вентиляционный.

Операция литьевого прессования состоит из переходов:

- смыкание формы, состоящей из элементов 1,2,5 и 6;
- загрузка предварительно нагретого пресс-материала в форму (загрузочную камеру 6);
- создание давления в загрузочной камере штоком 7 и перемещение пресс-материала в формирующую полость 4;
- выдержка под давлением;
- раскрытие пресс-формы;
- удаление прессованной детали из формы;
- очистка формы и загрузочной камеры.

При литьевом прессовании процесс отверждения пресс-материала занимает меньше времени, чем при компрессионном прес-

совании, так как в оформляющую полость пресс-материал поступает равномерно нагретым до рабочей температуры, полнее удаляются из него пары воды и летучие соединения.

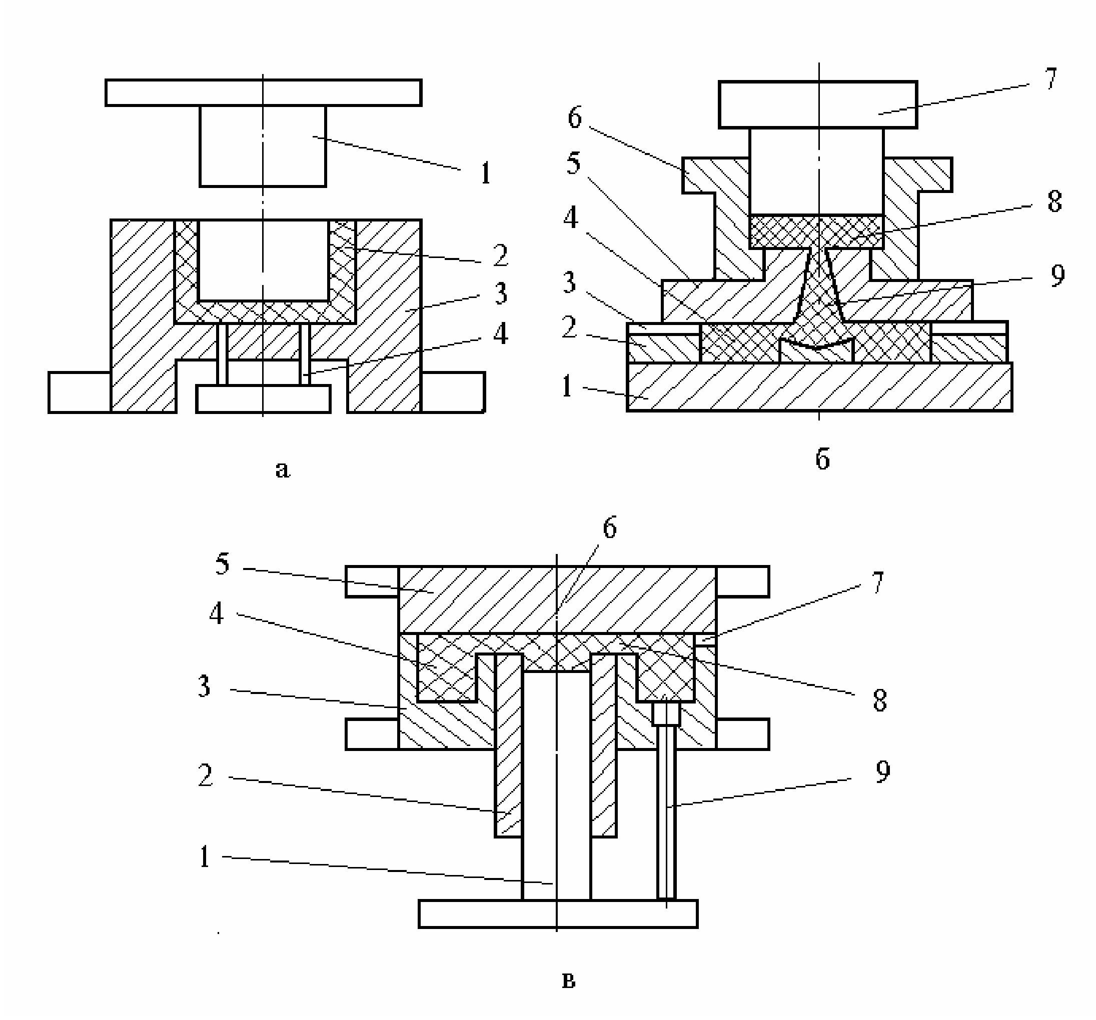


Рис. 12.9. Схема компрессионного (прямого) и литьевого

Благодаря более равномерному нагреву пресс-материала уменьшается коробление, так как отверждение в различных слоях детали происходит с одинаковой скоростью, и остаточные напряжения снижаются, поэтому можно получить качественные изделия при большой разнице в толщине стенок. Литьевое прессование кроме преимуществ имеет и недостатки: необходимость использования более высокого удельного давления прессования, сложность форм, увеличенный расход пресс-материала, поскольку часть его отверждается в литниковых каналах и загрузочной камере. Несмотря на эти недостатки метод незаменим при прессовании из реактопластов деталей сложной формы с тонкой арматурой или с отверстиями небольшого диаметра.

В качестве технологической оснастки при литьевом прессовании используют два вида форм: с верхней загрузочной (рис. 12.9, б) камерой; с нижней загрузочной камерой (рис. 12. 9, в).

Применение литьевых пресс-форм с нижней загрузочной камерой позволяет максимально механизировать процесс прессования или полностью его автоматизировать. Пресс-материал загружается в загрузочную камеру (рис. 12.9, в). При этом верхняя плита 5 находится в поднятом состоянии. При опускании плиты пресс-форма смыкается. Шток 1, соединенный с нижним гидроцилиндром пресса, выталкивает материал через литниковые каналы 8 в оформляющую полость 4 матрицы 3, где и происходит формование деталей. Воздух и пары воды, выделяющиеся при разогреве пресс-материала, удаляются из формы через воздушные каналы 7. После выдержки под давлением плита 5 поднимается. При ходе вверх штока 1 и выталкивателей 9 и 10 из оформляющих полостей выталкиваются детали 4 и пресс-остаток 6 из загрузочной камеры 2.

Основными параметрами режимов компрессионного литьевого прессования являются: температура предварительного нагрева пресс–материала; рабочая температура прессования; удельное давление прессования

Параметры режимов прессования выбирают по справочным данным или рассчитывают с учетом технологических свойств исходных пресс-материалов, конструкции формы, геометрии и размеров прессуемой детали.

Операции прессования выполняют на прессах, типоразмер которых выбирают по необходимому усилию прессования $P_{пр}$:

для компрессионного прессования

$$P_{пр} = p_{уд} F_{изд}\, n; \qquad (12.3)$$

для литьевого прессования

$$P_{пр} = p_{уд} F_{з.к.}, \qquad (12.4)$$

где $p_{уд}$ – удельное давление, необходимое для переработки пластмассы; $F_{изд}$ – площадь изделия в плоскости разъема; $F_{з.к.}$ – площадь загрузочной камеры; n – количество гнезд формы.

При использовании для литьевого прессования форм с верхней загрузочной камерой (рис. 12.9, б) необходимо выполнение условия

$$F_{з.к.} > 1{,}25(F_{изд}\, n + F_{л}),\qquad (12.5)$$

где $F_{л}$ – площадь литников в плоскости разъема; остальные обозначения даны выше. В противном случае произойдет раскрытие формы при прессовании.

Если использована форма с нижней загрузочной камерой (рис. 12.9, в), то усилие $P_{см}$, развиваемое верхним гидроцилиндром пресса, должно соответствовать условию

$$P_{см} > 1{,}25\, p_{уд}(F_{изд}\, n + F_{л} + F_{з.к.}).\qquad (12.6)$$

Дальнейшее совершенствование операций по переработке термопластов идет по пути замены методов прессования на метод литья под давлением. Это стало возможным благодаря созданию литьевых машин специально для переработки реактопластов и разработке рецептур пресс-материалов, обладающих свойством гранулироваться и отверждаться с высокой скоростью. В отличие от литья под давлением термопластов вместо охлаждения пресс-формы проводится ее нагревание.

12.2.5. Механическая обработка пластмассовых деталей

Методы механической обработки пластмассовых деталей используют для следующих целей: удаления облоя, литников, а также снятия фасок по месту разъема формы; выполнения отдельных элементов детали, которые трудно получить методами литья или прессования, например, боковые пазы и отверстия; повышения точности размеров и качества поверхности отдельных элементов детали, если требования точности и шероховатости лежат за пределами экономически целесообразных возможностей методов переработки пластмасс.

Применяют такие методы механической обработки, как точение, фрезерование, сверление, развертывание, шлифование и полирование. При обработке термопластов используют лезвийные инструменты из любых инструментальных материалов, а при обработке реактопластов – преимущественно абразивные или лезвийные из сверхтвердых материалов, поскольку реактопласты, наполненные стекловолокном или кварцевой мукой, вызывают повышенный износ обычных инструментальных материалов. Характерным препятствием для производительной обработки резанием является низкая теплопроводность пластмасс, вызывающая местный разогрев пластмасс в зоне обработки и

приводящая к различным негативным явлениям. Например, при сверлении коммутационных отверстий в многослойных печатных платах разогретая пластмасса обволакивает срезы фольги, входящие в отверстие, и затрудняет получение электрической коммутации между слоями платы.

При сверлении различных монтажных отверстий в пластмассовых деталях их размер нередко получается уменьшенным по сравнению с размерами сверла, и это необходимо учитывать при выборе инструментов. При обработке армированных пластмасс, обладающих анизотропией прочности, под действием усилий резания происходит расслоение материала. Аномальным явлением с точки зрения практики резания лезвийными инструментами является повышение износа при снижении скорости резания в процессе обработки некоторых пластмасс [14] (рис. 12.10). Все это свидетельствует о том, что перенос огромного опыта резания металлов в области обработки пластмассовых деталей затруднен. Из нескольких методов обработки резанием пластмасс, равноценных по техническим возможностям, может быть отобран один по коэффициенту обрабатываемости k_p:

$$k_p = V_m/(V_и R_z N_p), \qquad (12.7)$$

где V_m – объем срезаемого полимера, м^3/с; $V_и$ – объемный износ режущего инструмента, м^3/с; R_z – параметр шероховатости поверхности, мкм; N_p – расход энергии, затраченной на срезание объема, кВт.

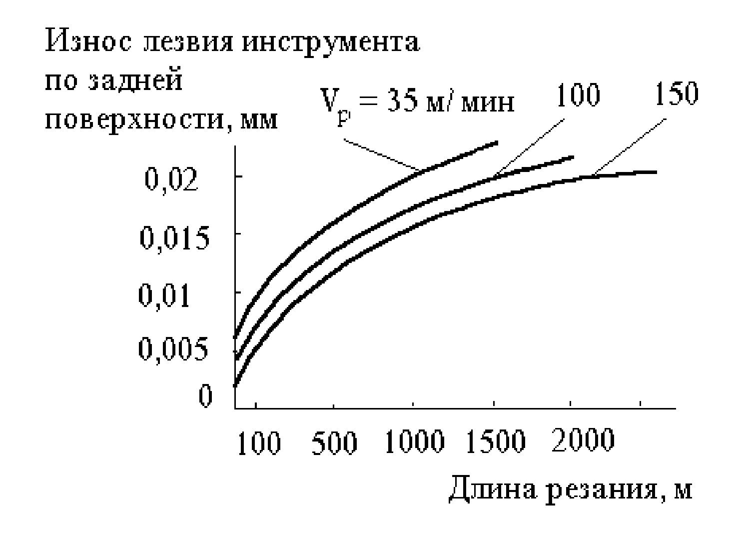


Рис. 12.10. Зависимость износа лезвийного инструмента от скорости резания

12.3. Изготовление деталей из керамики

Исходными материалами для получения керамики являются каолин, андалузит, глинозем, полевой шпат, циркон, цирконосиликаты и другие материалы, имеющие температуру обжига в пределах 1250–1450°С.

Структура технологического процесса изготовления керамических деталей, так же как при изготовлении пластмассовых деталей, в первую очередь зависит от рецептурного состава керамического материала, выбранного из условия наиболее полного удовлетворения технических требований, предъявляемых к детали, и экономичности ее изготовления.

Основные этапы технологического процесса изготовления керамических деталей следующие:

- приготовление исходной рецептурной керамической массы;
- приготовление технологической керамической массы;
- формообразование;
- низкотемпературный обжиг для удаления технологической связки;
- высокотемпературный обжиг, формирующий основные физические свойства керамических деталей;
- доработка деталей с целью формирования специфических физических свойств, геометрии и размеров детали.

Приготовление рецептурной керамической массы состоит из операций очистки сырьевых материалов, их дробления, помола, магнитной сепарации и отделения фракций (по размерам зерна) каждого компонента в отдельности. В этот же этап входят операции дозирования, смешивания компонентов между собой и с водой, тонкий помол смеси из всех компонентов и обезвоживание смеси в фильтр-прессах. Исходная рецептурная керамическая масса представляет собой коржи, содержащие 23–25% влаги.

Выбор варианта содержания второго и третьего этапов технологического процесса взаимосвязаны, так как метод формообразования предполагает использование того или иного вида технологической керамической массы, отличающейся от коржей содержанием влаги, воздушных включений и наличием технологической связки. В свою очередь, выбор метода формообразования зависит от технологических свойств рецептурной массы и, прежде всего, от содержания глинистых составляющих, от формы и размеров детали, а также от масштаба производства. Штампование деталей выполняют из пластичной массы с

большим содержанием глин (радиофарфор, ультрафарфор) с добавкой гидроорганических пластификаторов. Прессование из пресс-порошков характерно при изготовлении деталей из малопластичных рецептурных масс (стеатитовая керамика из талька).

Горячее литье под давлением в металлические формы является универсальным способом, пригодным для любых керамических рецептурных масс. Этот способ позволяет легко автоматизировать технологический процесс, но экономически целесообразен только в крупносерийном и массовом производстве, так как требует более дорогостоящего оборудования. Формообразование холодным литьем водного шликера в пористых формах целесообразно применять для получения крупногабаритных деталей. Этим методом получают детали в виде трубок и стержней. Низкотемпературным обжигом при температуре до 1173–1773 К удаляют технологическую связку.

Основные свойства керамических деталей формируются при высокотемпературном обжиге (обычно 1373–1773 К), при котором происходят химические реакции, диффузионные процессы и кристаллизация, изменяются размеры деталей и плотность материала. От режима обжига в значительной мере зависят механическая и электрическая прочность, электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость и другие физические характеристики. Охлаждение детали во избежание появления трещин и внутренних напряжений следует проводить медленно. В зависимости от метода формообразования размеры деталей изменяются от долей процента до 30%.

При доработке керамических изделий используют методы металлизации поверхности, поляризации (для пьезокерамики), механической абразивной обработки для повышения точности размеров, покрытия легкоплавкими сплавами.

12.4. Технологические требования, предъявляемые к конструкциям деталей из пластмасс, керамических и металлокерамических материалов

Требования к конструкции деталей из пластмасс, керамики и металлокерамики обусловлены используемыми методами их формирования.

Так, при конструировании деталей из пластмасс должны быть учтены следующие основные требования:

• равнотолщинность стенок, так как скопление материала в отдельных местах приводит к короблению деталей и к увеличению времени изготовления;
• уклон плоских и конусность цилиндрических стенок в направлении прессования для облегчения извлечения деталей из формы;
• поднутрения (выемки, отверстия) в направлении, перпендикулярном прессованию, весьма нежелательны, так как они усложняют конструкцию формы, снижают производительность и увеличивают стоимость изготовления;
• цилиндрические отверстия должны быть более 1,5 мм, а резьбовые – 3 мм (более мелкие отверстия, гладкие и с резьбой рекомендуется получать введением металлической арматуры или механической обработкой - сверлением и нарезанием метчиками при доработке пластмассовых деталей);
• металлическая и неметаллическая арматура должна иметь выточки, отверстия, накатку для надежного закрепления в материале детали после формообразования;
• повышение прочности деталей должно достигаться введением ребер жесткости, а не увеличением толщины стенок;
• переходы одних элементов детали в другие (стенка под углом, уступы) должны быть оформлены закруглениями, минимальный радиус которых 1–1,5 мм.

Требования к металлокерамическим и керамическим деталям аналогичны перечисленным требованиям за исключением требований по арматуре. В керамических деталях при формообразовании арматура не используется, так как она при спекании расплавляется. Дополнительным требованием к керамическим деталям является доступность поверхностей, подвергаемых дополнительной абразивной обработке после обжига.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте технологические свойства пластмасс.
2. Опишите оборудование, применяемое при изготовлении деталей из пластмасс.
3. Горячее и холодное прессование деталей из пластмасс.
4. Литье деталей из пластмасс.
5. Технологический процесс изготовления деталей из металлокерамики.
6. Основные этапы технологического процесса изготовления керамических деталей.

Глава XIII. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Электрофизические и электрохимические методы обработки подразделяются на четыре основные группы: электроэрозионные, ультразвуковые, лучевые и электрохимические. Каждый из методов имеет уникальные технологические возможности, но все они более энергоемки по сравнению с традиционными формообразующими методами (обработкой резанием, давлением, литьем). Поэтому использование этих методов может быть оправдано только в следующих случаях: для обработки конструкционных материалов, имеющих низкую обрабатываемость лезвийными и абразивными инструментами (высоколегированные стали, твердые сплавы, ферриты, керамика, полупроводники, рубин, кварц и др.); для обработки миниатюрных тонкостенных нежестких деталей, а также для обработки деталей сложной формы с пазами и отверстиями, имеющими размеры несколько микрометров и меньше (выводные рамки корпусом микросхем, маски фотошаблонов, трафареты и т.д.); для обработки в средах, в которых обработка традиционными методами затруднена или невозможна.

13.1. Электроискровая обработка

Электроискровая обработка – наиболее распространенный метод обработки металлов электрической эрозией. Под действием потока электронов, вылетающих с катода и с огромной скоростью бомбардирующих анод, происходит мгновенное расплавление и испарение части металла анода. При этом происходит как бы микровзрыв, уносящий молекулы металла с анода на катод. Преимущественно разрушается анод (обрабатываемая деталь), при этом форма и размеры разрушенного участка воспроизводят форму и размеры поперечного сечения катода (инструмента).

Искра между электродами 1 (инструмент) и 3 (деталь) получается в результате разряда конденсатора С (рис. 13.1). Размерная электроискровая обработка ведется в жидкой среде, обладающей диэлектрическими свойствами.

Источником питания является генератор однополярных импульсов. Напряжение 30–200 В, сила тока 1–50 А, время зарядки конденсатора $T_{зар}$ = 0,001–0,0001 с, время разрядки $T_{раз} = 10^{-5}–10^{-8}$ с. Из-за высокой скорости протекания процесса деталь практически не нагревается, хотя основная часть получаемой при разряде энергии выделяется в виде теплоты (t = 6000–11000°С), идущей на плавление и испарение обраба-

тываемого участка детали. Лишь очень небольшая часть теплоты поглощается электродами.

Электроискровым способом можно обрабатывать материалы любой твердости, вязкости, хрупкости и химической активности. При этом единственным условием является то, чтобы поверхность обрабатываемой заготовки в момент прохождения электрического импульса обладала электрической проводимостью.

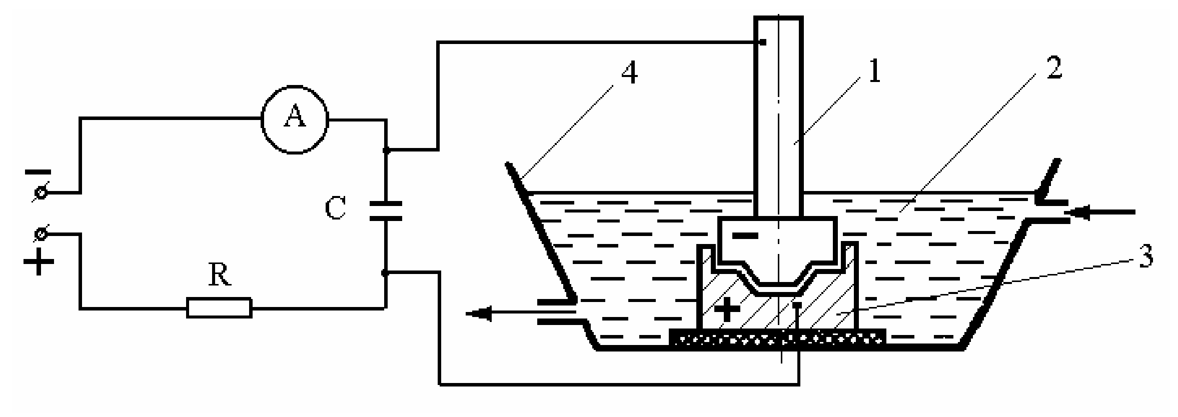


Рис. 13.1. Схема электроискровой обработки

Электроискровая обработка широко применяется в промышленности при обработке полостей штампов, литейных форм и пресс-форм; при получении отверстий различной конфигурации, криволинейных щелей и пазов; при контурной резке, клеймении, удалении сломанных инструментов и крепежа из детали и т.п.

Для обработки отверстия производительность процесса электроискровой обработки на жестких режимах составляет 500 мм ^{3}/ мин. Шероховатость обрабатываемой поверхности уменьшают, снижая энергию импульса увеличением частоты следования импульсов и снижением средней мощности в зоне обработки. Поскольку при электроискровой обработке в рабочей зоне реализуется значительная тепловая энергия, на обработанной поверхности образуется слой с измененной структурой, толщина которой в зависимости от режимов обработки составляет 0,15–0,35 мм.

Точность электроискровой обработки определяется точностью изготовления электрода-инструмента, точностью и жесткостью механической части станка, режимом обработки, составом рабочей жидкости, способом ее подачи, и составляет 0,05–0,2 мм. В табл. 13.1 приведены операции, выполняемые методом электроискровой обработки, где на эскизах операций: 1 – катод-инструмент; 2 – обрабатываемая деталь.

Таблица 13.1

Операции, выполняемые методом электроискровой обработки

Операции	Характер подачи	Схема технологического процесса	Примеры изготовляемых деталей или их элементов
1	2	3	4
Прошивка круглых и фасонных глухих и сквозных отверстий	Поступательное движение электрода-нструмента по форме отверстий		Проходные щели малого размера в гильзах, соплах, фильтрах и т.д.; сетки, сита, решетки различного назначения; форсунки с отверстиями малого диаметра; поплавки; корпуса; переборки и другие сборные детали и узлы
Прошивка отверстий с косой и винтовой осями	Поступательное движение электрода-инструмента или поступательное движение в сочетании с вращательным по винтовой линии		Смазочные отверстия в рамах, корпусах и валах; змеевики в зеркальных, стальных и твердосплавных блоках
Нарезание наружной и внутренней резьбы	Вращательное и поступательное движение электрода-нструмента по винтовой Линии		Твердосплавные пластинки с механическим креплением к детали; резьбы в закаленных стальных деталях

Продолжение табл. 13.1

1	2	3	4
Вырезка деталей по контуру	Поступательное движение электрода-инструмента		Плоские детали сложной формы; магнетроны
Прорезка пазов, щелей и шлицов	Сочетание вращательного с поступательным движением или только поступательное движение электрода-инструмента. В первом случае электрод-инструмент выполнен в виде диска, во втором – в форме пластины		Цилиндрические и плоские детали; золотниковые распределители фильтров
Обработка внутренних фасонных поверхностей	Поступательное движение электрода-инструмента		Гильзы клапанов и других подобных деталей приборов; соединения каналов в корпусных деталях приборов
Вырезка деталей по контуру	Поступательное движение проволоки (электрода-инструмента) при ее перемотке и поступательное движение стола в направлении проволоки по определенной программе		Золотниковые гильзы, клапаны

Продолжение табл. 13.1

1	2	3	4
Обработка наружной или внутренней поверхности детали	Поступательное движение проволоки (электрода-инструмента) и поступательное движение стола в направлении проволоки по определенной программе		Электроды-гребенки для обработки фильтроэлементов; плоские детали сложной формы
Наружное круглое шлифование	Вращательное и поступательное движение электрода-инструмента в сочетании с возвратно-поступательным и вращательным движением детали		Сборные роторы мелких электродвигателей; магниты; валы; оси и другие детали тел вращения из труднообрабатываемых материалов
Внутреннее круглое шлифование	Вращательное движение электрода при его возвратно-поступательном движении		Сборные статоры мелких электрических машин; магниты; детали типа втулок из труднообрабатываемых материалов

13.2. Анодно-механическая обработка

Анодно-механическая обработка (рис. 13.2) является широко применяемым видом электрохимической и электрофизической обработки.

При анодно-механической обработке деталь подвергается:

- импульсному тепловому воздействию тока, в результате которого металл плавится, как при электроискровой обработке и растворяется в рабочей жидкости;

• механическому воздействию катода – рабочего инструмента (диска), который, вращаясь, снимает анодную пленку и расплавленный металл.

Скорость обработки зависит от плотности тока, давления инструмента, физико-химических свойств материала обрабатываемой детали. При анодно-механической резке инструментом является стальной диск, толщина которого в 1,5–2 раза меньше ширины реза.

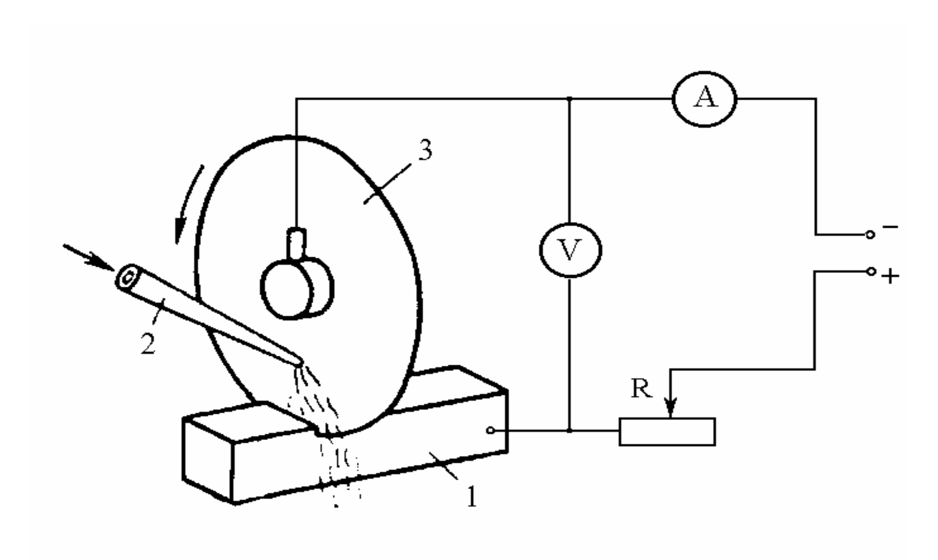


Рис. 13.2. Схема анодно-механической обработки

Методом анодно-механической обработки можно выполнить отделочное и притирочное шлифование. При чистовой обработке в качестве рабочей жидкости используется раствор хлористого или сернистого натрия и других солей.

Анодно-механическая обработка может выполняться с применением абразивонесущего инструмента (электрообразивная обработка или электромеханическое шлифование) и абразивонесущего электролита.

Для выполнения операций анодно-механической обработки используются анодно-механические станки и установки.

Применение в качестве рабочей жидкости раствора хлористого натрия или смеси хлористого и азотнокислого натрия позволяет получить высокое качество поверхности при размерной обработке сплавов на никелевой основе и высокохромистых сталей.

Недостатком анодно-механического способа обработки является необходимость смывать с обрабатываемой детали остатки жидкого стекла и сильное загрязнение рабочего места.

13.3. Электронно-лучевая обработка

Сущность метода электронно-лучевой обработки состоит в использовании энергии электронов, получаемой при интенсивной бомбардировке ими места обработки [8]. Движение электронов, испускаемых накаливаемым катодом, расположенным в вакуумной камере, ускоряется под действием приложенного высокого напряжения (рис.13.3).

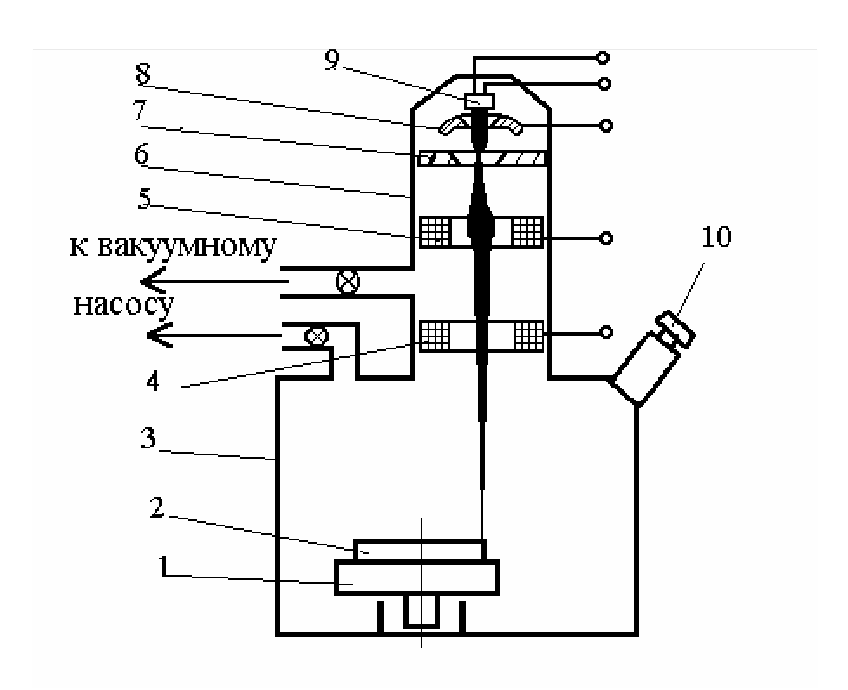


Рис. 13.3. Установка для электронно-лучевой обработки:

1 – шпиндель; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – вакуумная камера; 4 – отклоняющая магнитная система; 5 – фокусирующая магнитная линза; 6 – корпус электронной пушки; 7 – анод; 8 – фокусирующая система; 9 – катод; 10 – объектив для наблюдения за процессом

Рабочая камера снабжена необходимыми устройствами для перемещения обрабатываемой детали и продуктов обработки. Генерация электронного пучка и его прохождение до объекта обработки возможны только в высоком вакууме, поэтому необходимо откачивать как электронную пушку, так и рабочую камеру до давления не менее 10^{-2} Па.

При столкновении электронов с обрабатываемым материалом почти вся кинетическая энергия превращается в тепловую. В результате воздействия электронного пучка, создающего высокую поверхностную плотность теплового потока, материал не только плавится, но и испаряется. Особенностью теплового эффекта, создаваемого электронным лу-

чом, является чрезвычайная кратковременность, благодаря которой нежелательные химические реакции, например, окисление, не имеют места.

Практическое применение рассматриваемый метод нашел при микромеханической обработке (прошивке отверстий, получении мельчайших щелей в деталях из твердых и тугоплавких материалов – вольфрама, кварца стекла, феррита), а также при микросварочных операциях (электронным лучом в вакууме можно сваривать тугоплавкие и легкоокисляющиеся металлы - коррозионно-стойкую сталь, медь, молибден, причем отсутствие механических воздействий повышает надежность соединения).

Электронно-лучевой метод можно применять для выполнения соединений в микроминиатюрной аппаратуре, для испарения металла при осаждении пленок в тонкопленочных схемах. Сложность этого вида обработки заключается в получении электронного луча малого диаметра порядка нескольких микрометров.

13.4. Лазерная и плазменная обработка

Лазерная обработка – это обработка материалов концентрированной тепловой энергией, возникающей в результате сосредоточения специально сформированного светового луча на обрабатываемом участке. Преимущество лазерной обработки по сравнению с элетронно-лучевой заключается в том, что она не требует вакуума.

Источником светового луча являются лазеры. В зависимости от активных элементов, применяемых в лазерах, их можно разделить на твердотельные, газовые и полупроводниковые. При штамповке и сварке любых материалов целесообразно применять твердотельные лазеры, а в ряде случаев, главным образом для размерной обработки, можно использовать и газовые лазеры.

На рис. 13.4 приведена схема твердотельного лазера. Конденсаторная батарея 6, заряженная от блока питания 7 посредством блока инициирующего разряда 8, включает импульсную газонаполненную лампу 5. Световой поток лампы с помощью рефлектора 2 концентрируется на активном элементе 3, возбуждая его. Луч света, испускаемый активным элементом, усиливается многократным отражением от глухого зеркала 1 и выходного полупрозрачного зеркала 4 и выходит из лазера в виде узконаправленного светового луча с малым углом расходимости.

Светофокусированный луч лазера диаметром в несколько микрометров при попадании на поверхность обрабатываемой детали разогревает ее до нескольких тысяч градусов и прожигает отверстия диаметром от 0,03 до 0,5 мм и глубиной несколько миллиметров, скорость обработки 30–60 отверстий в минуту.

Лазерная обработка дает возможность обработать малые отверстия под любым углом относительно вертикали или горизонтали, позволяет получить высокое качество обрабатываемых изделий, организовать технологические линии с разнообразными операциями (сверлильными, разрезными, сварочными, балансировочными и т.д.), выполнить соединение разнородных материалов, например, металлов со стеклом в корпусах микросхем, гермовводах и т.п.

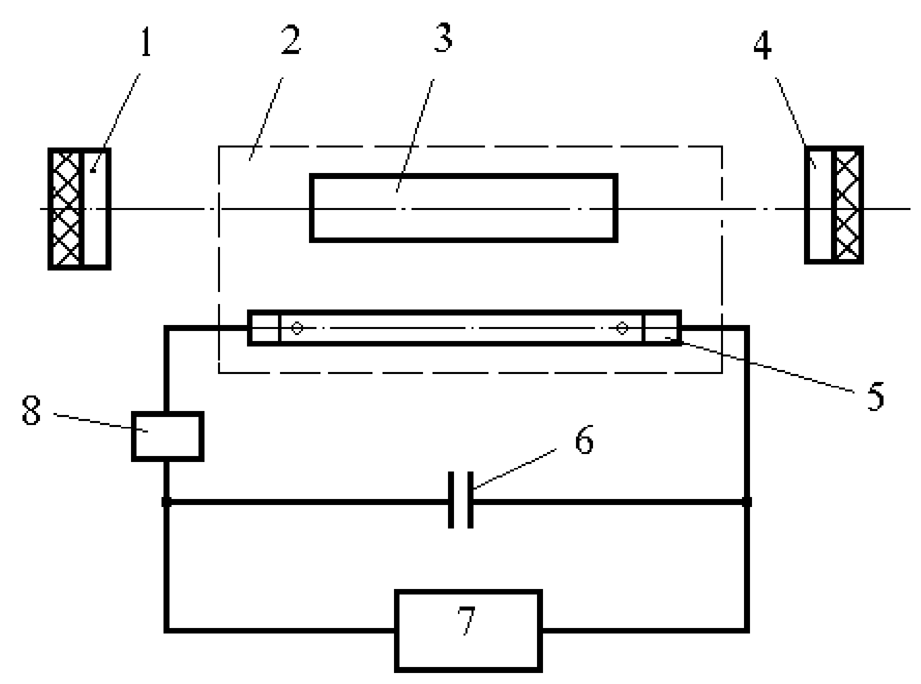


Рис. 13.4. Схема твердотельного лазера

Плазменная обработка. Под плазменной обработкой понимается обработка материалов низкотемпературной плазмой – частично или полностью ионизированным газом. Плазма генерируется дуговыми или высокочастотными плазмотронами.

При плазменной обработке изменяются форма, размеры, структура обрабатываемого материала или состояние его поверхности. С помощью этого вида обработки выполняют разделительную и поверхностную резку, нанесение покрытий, наплавку, сварку и другие виды работ.

13.5. Ультразвуковая обработка

Среди современных электромеханических процессов ультразвуковая обработка материалов относится к числу наиболее известных и освоенных промышленностью. Наиболее эффективна ультразвуковая размерная обработка материалов, обладающих повышенной хрупкостью (стекло, кварц, керамика, алмаз, кремний, феррит и т.д.). Эти материалы при ультразвуковой обработке практически не подвергаются пластической деформации. Применение этой обработки нецелесообразно для пластических материалов, таких как мягкие стали, так как в этом случае почти вся работа абразива расходуется на микропластическую деформацию и абразивного разрушения материала не происходит.

С помощью ультразвука осуществляется:

- механическая обработка твердых сплавов и минералов (дробление, прошивка и т.д.). При этом возможно получение отверстий диаметром 0,01–0,15 мм;
- удаление поверхностных пленок (промывка, чистка, травление деталей и др.);
- бесфлюсовая пайка и лужение металлов;
- точечная сварка тонколистовых металлов, термопластов и металлов с пластмассами;
- получение эмульсий и суспензий, изготовление мельчайших порошков;
- обнаружение дефектов внутри металла;
- ускорение процессов гальванического покрытия;
- повышение качества термообработки.

Принцип ультразвуковой обработки материалов основан на совместном действии ультразвуковых (частота 16 и выше кГц) колебаний и высокодисперсной абразивной суспензии, которая находится в зазоре между обрабатываемой деталью и продольно вибрирующим инструментом.

Ультразвуковая установка (рис. 13.5) состоит из генератора 7 высокой частоты, задающего колебания, магнитострикционного излучателя 8 и концентратора колебаний 9, к которому присоединен инструмент 3. Обрабатываемая деталь 5 помещается в ванну 1, наполненную абразивной суспензией 2 (карбид бора или кремния). Рабочая часть инструмента погружается в суспензию, возбуждая в ней высокочастотные колебания порядка 70 кГц.

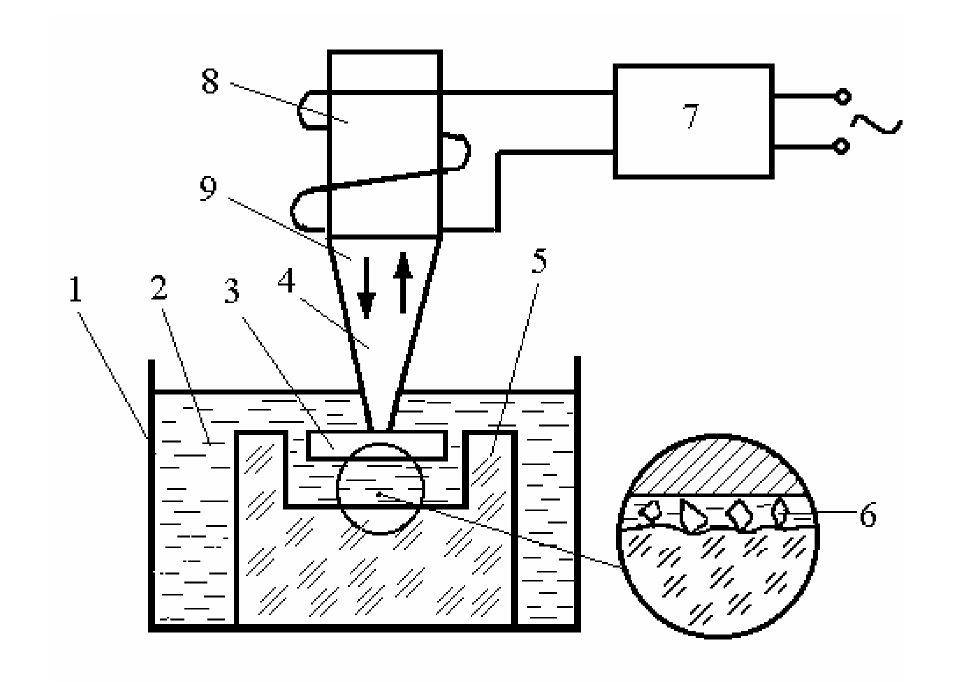


Рис. 13.5. Схема установки для ультразвуковой обработки

Под действием ультразвуковых колебаний абразивные зерна 6 с большой силой ударяются в обрабатываемую поверхность и разрушают ее. Ультразвуковая энергия передается только в одном направлении, и область ее действия ограничивается контуром сечения рабочей части инструмента. В качестве инструмента используются, как правило, составные концентраторы, образуемые соединением стержней постоянного и переменного сечения.

Рассматриваемый метод позволяет вырезать детали размером 0,2–120 мм, обрабатывать площади 16–3000 мм^2, углубления 0,2–60 мм и получать усилие подачи 0–300 Н.

Точность обработки и достижимая шероховатость поверхности при ультразвуковой обработке определяется многими технологическими факторами, в частности зернистостью применяемого абразива и режимами ведения процесса. На шероховатость обрабатываемой поверхности влияет также шероховатость поверхности инструмента.

При ультразвуковой обработке наблюдается разбивание отверстия, т.е. его поперечные размеры получаются несколько большими соответствующих размеров инструмента. Кроме того, отверстия, полученные этим методом, имеют конусность. Погрешности зависят от зернистости применяемого абразива, и они тем меньше, чем мельче абразив. Наиболее высокие точности (0,005 мм) можно достичь при использовании микропорошков.

13.6. Электрохимическая обработка

По характеру действия электрического тока методы электрохимической обработки подразделяются на три группы:

1. Методы с преимущественным использованием химического действия тока. К этой группе относятся: конверсионная обработка, травление и очистка, электрополирование и электроглянцевание, размерная обработка, электрообразивная и электроалмазная обработка.

2. Методы с преимущественным использованием теплового действия электрического тока. К этой группе относятся электроконтактная обработка, электроимпульсная обработка, светолучевая обработка.

3. Методы с преимущественным использованием механического действия тока или поля. К этой группе относятся электровзрывная обработка, электромагнитное формообразование, электрофоретическое нанесение покрытий.

Первая группа процессов определяется явлением анодного растворения металла и удаления продуктов электрохимической реакции с обрабатываемой поверхности. Электрополирование [9] в неподвижном электролите (рис. 13.6, а) представляет собой электрохимический процесс растворения поверхности детали. В ванну 4 с электролитом 3 помещены катод 2 и деталь-анод 1. В электролите молекулы вещества распадаются на электрически заряженные частицы – ионы, каждый из которых несет на себе электрический заряд. Происходит анодное растворение материала детали, что и используется для обработки. Процесс электрополирования весьма экономичен. По сравнению с механическим полированием он обладает следующими преимуществами: не происходит деформация поверхностного слоя и исключается возможность внедрения абразивных зерен в поверхностный слой металла; повышается коррозионная стойкость детали; возможно одновременное полирование большого числа деталей любой конфигурации. Обработка по этому способу может применяться для формообразования деталей сложной формы (при этом обрабатываемая деталь приобретает форму, представляющую собой зеркальное отображение электрода-инструмента), прошивки отверстий, обработки фасонных пазов и щелей, поверхностей типа тел вращения и т.п. На скорость протекания процесса электрохимической обработки влияет плотность тока, тип применяемого электролита, исходная структура материала детали.

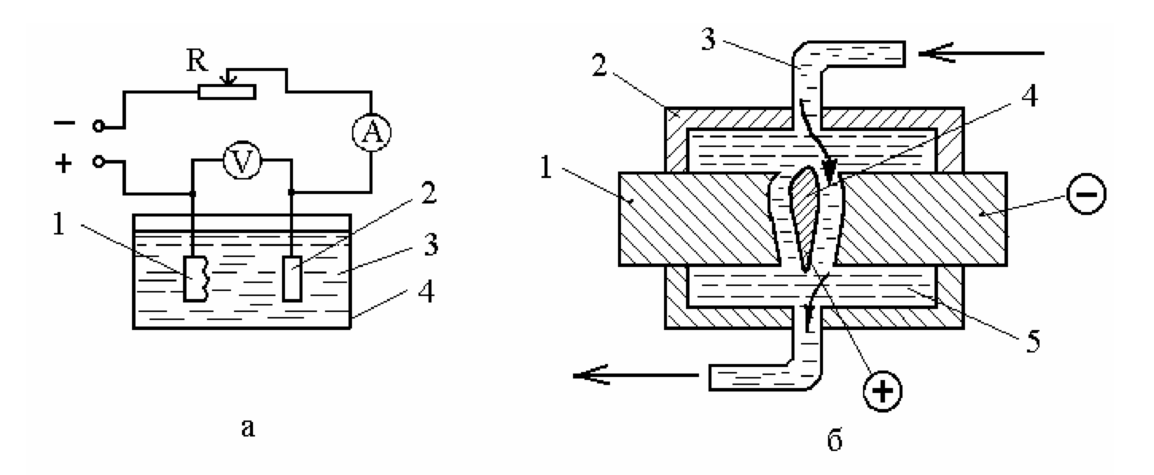


Рис. 13.6. Принцип электрохимической обработки
а – схема электрополирования; б – схема электрополирования криволитейных поверхностей

При электрополировании, например лопатки турбины (рис. 13.6, б), в корпус 2 монтируют катоды 1, имеющие профилированную щель по форме лопатки турбины. Заготовка 4 после обработки приобретает заданную форму. Электролит 5 подкачивают через трубопроводы 3.

13.7. Общая структура, точность, производительность и экономическая эффективность электрофизических и электрохимических технологических процессов

Типовой технологический процесс электрофизической (ЭФ) и электрохимической (ЭХ) обработки включает следующие основные этапы: подготовку детали к обработке, собственно обработку (ЭЭО, ЭЛО, УЗО, СЛО, плазменную или ЭХО), контроль.

Подготовка деталей к обработке ЭФЭХ методами

При наличии на поверхности окалины, ржавчины и других загрязнений детали подвергаются обезжириванию, промывке, травлению, повторной промывке и сушке. Если ЭХО проводят сразу же после промывки, то детали не сушат.

Небольшие плоскопараллельные детали перед обработкой (УЗО, ЭЛО, СЛО) приклеивают к стеклянной технологической подложке различными клеевыми материалами (например, на основе канифоли, шеллака, эпоксидных смол, а также клея БФ-4 или КС). Закрепление технологических подложек и обрабатываемых деталей на столе установки осуществляется прижимами или специальными приспособлениями.

Электроэрозионная обработка. К деталям, поступившим на ЭЭО, предъявляют следующие требования: они должны иметь две координатные базы с шероховатостью Ra 2,5 мкм; профилированный электрод-инструмент следует изготовлять с точностью на 1–2 квалитета выше обрабатываемой детали; детали, подлежащие термообработке, должны быть термически обработаны перед ЭЭО. При обработке деталей непрофилированным инструментом-проволокой предварительно сверлят технологические отверстия.

Точность размерной обработки и шероховатость поверхности деталей зависят от режимов ЭЭО, конструкции электрода-инструмента и др. Для достижения наивысшей производительности и получения требуемой шероховатости обработанной поверхности обработку выполняют в несколько переходов. Сначала проводят черновую обработку, удаляя основную массу металла, затем чистовую и отделочную обработку, т.е. сначала обрабатывают импульсами большой энергии и длительности, а затем, постепенно снижая энергию и длительность импульсов, сглаживают микронеровности. Производительность такой обработки еще более повышается при использовании станков с ЧПУ с автоматической сменой инструмента и режима обработки.

В качестве примера рассмотрим ЭЭО деталей типа сеток и сит, изготовленных из листового конструкционного материала (коррозионно-стойкие стали, латуни, алюминий и его сплавы, никель, молибден и др.) толщиной до 2 мм. Требования к качеству сеток, применяемых в электронной технике, очень высоки: допуски на ширину и шаг перемычек ±0,002 мм, на наружные размеры сетки (окружность, квадрат, прямоугольник и др.) ±0,01мм, шероховатость обработанной поверхности Ra 0,32–0,16 мкм. Эти требования выполняют одновременным изготовлением отверстий одним инструментом (до 800 отверстий диаметром 0,2–2 мм). При этом достигают высокой производительности обработки (до10^4 отв/ч). Режимы обработки сеток: напряжение 100 – 150 В, ток короткого замыкания 0,5–0,25 А, емкость конденсатора 0,02–5 мкФ. Материал электрода-инструмента – медь, латунь; диэлектрическая среда – керосин. После выполнения ЭЭО детали обезжиривают и промывают в проточной горячей и холодной воде и сушат при 363–383К в течение 10–15 мин.

Ультразвуковая обработка. Производительность, точность, качество обработанной поверхности при УЗО зависят от амплитуды и частоты колебаний инструмента, физико-химических свойств обрабатываемого материала и абразива, зернистости и концентрации абразива в

водной суспензии, площади и конфигурации поперечного сечения инструмента, усилия подачи инструмента и глубины обработки. Оптимальные условия, при которых производительность УЗО возрастает по зависимости, близкой к линейной, следующие:

- амплитуда колебаний от 0,03 до 0,08 мм,
- усилие подачи инструмента от 5 до 20 Н,
- зернистость абразива от№3 до №12,
- концентрация абразива в водной суспензии 1:2.

При обработке сквозных отверстий абразивом №3–№5 конусность составляет 20 мкм на 1 мм глубины, некруглость – 0,03–0,05. При соотношении диаметра и глубины отверстия 1:2 достижимая точность по конусности и некруглости составляет 0,05 мм. Характеристики ультразвуковой обработки отверстий некоторых материалов приведены в табл. 13.2. После выполнения УЗО для удаления остатков абразивной суспензии детали тщательно промывают в проточной воде с последующей сушкой.

Электронно-лучевая обработка. Экономическая точность изготовления отверстий и пазов с заданной шероховатостью поверхности обеспечивается при следующих технологических режимах ЭЛО: ускоряющее напряжение 6–100 кВ, сила тока 0,005–5 А, длительность импульса 10^{-4}–10^{-6} с, частота следования импульсов 1–50000 Гц, плотность мощности 10–100 Вт/м^2, диаметр обрабатываемой зоны 1–1000 мкм. В зависимости от обрабатываемого материала, размеров отверстий и пазов, требования к точности размеров шероховатости поверхности определяются в каждом конкретном случае оптимальными режимами электронно-лучевой обработки. Например, для ЭЛО отверстий в деталях из никельцинковых ферритов марки 300 НН (Fe_2 O_3 – 66,7 %; Ni O – 15,1%; ZnO – 17,6 , Co – 0,6%) толщиной 0,2 мм оптимальными значениями параметров обработки являются: ускоряющее напряжение 60 кВ, ток электронного пучка в импульсе 1,5–2 mA, число импульсов в «пачке» 10–14, общее время воздействия электронного пучка на заготовку 20 mc. При таком режиме ЭЛО магнитные свойства ферритовых пластин практически не изменяются. Шероховатость обработанной поверхности R_a 0,32–0,16 мкм.

Лазерная обработка. Экономическую точность и шероховатость поверхностей получают при следующих технологических режимах: плотность мощности 10^{12}–10^{33} Вт/м^2 , мощность 10^4–10^6 Вт, энергия импульса 10–30 Дж, длительность импульса 10^7–10^{-3} с, диаметр пятна луча 1–100 мкм. Достижимая точность составляет 1% диаметра полу-

чаемого отверстия. Скорости резания лазером некоторых конструкционных материалов реализуется в пределах 0,5–5 м/мин. Применение лазеров для разрезания позволяет получить линию реза сложной формы без заусенцев с прямоугольной кромкой реза.

Таблица 13.2

Характеристики ультразвуковой размерной обработки отверстий в некоторых конструкционных материалах

Обрабатываемый материал	Экономическая точность обработки, мкм	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Относительный износ инструмента, %
Стекло, кварц, ситал	20–100	5–25	0,5–1
Германий, кремний, ферриты	30–100	1,25–0,63	1–2
Керамика ЦМ 332	50–100	2,5–0.63	2–10
Твердые сплавы	20–50	2,5–0,32	40–400
Закаленная сталь HRC 50 –60	30–100	2,5–0,32	120–200
Жаропрочные стали	80–100	2,5–0,63	150–200

Электрохимическая обработка. Преимущества ЭХО перед резанием проявляется с увеличением твердости обрабатываемого материала. Производительность ЭХО не зависит от твердости обрабатываемого материала и в 7–10 раз превосходит обработку резанием при формообразовании деталей высокопрочных твердых сплавов.

Электрополирование. Шероховатость поверхности при электрополировании зависит как от состава электролитов и режимов обработки, так и от исходной шероховатости полируемой поверхности заготовки. Например, для получения шероховатости обработанной поверхности Ra 0,16 мкм исходная поверхность заготовки должна иметь шероховатость не ниже Ra 2,5 мкм. Электрополирование деталей из нержавеющих сталей, сплавов на основе никеля и молибдена проводят в электролите следующего состава: 50–60 % фосфорной кислоты; 20–30

% серной кислоты; 20% воды. Режим обработки: напряжение на электродах 10–40 В, плотность тока $(1–3)\cdot10^6$ А/м^2, температура 333–353 К. время полирования 0,5–5 мин. Электрополирование деталей из титана, хрома, ниобия и их сплавов проводят в электролите следующего состава: 83–85% этиленгликоля, 3–4% плавиковой кислоты, 5–6% фтористого аммония, 5–6% азотного, вода – остальное. Режим полирования: напряжение 20–50 В, плотность тока $(0,5–1,5)10^6$ А/м^2 температура 333–363 К. Время полирования 1–3 мин.

Анодно-механические способы чистовой обработки обеспечивают точность по 6–9 квалитетам и шероховатость обработанной поверхности Ra 1,25–0,32 мкм. Электроалмазная обработка стальных деталей проводится при следующих режимах: напряжение 6–10 В, плотность тока до $2х10^6$ А/м^2, скорость круга 20–25 м/с, давление круга 0,4–0,5 МПа. Процесс экономичен, так как расход инструмента снижается примерно в 10 раз по сравнению с обычным алмазным шлифованием, поскольку при обработке 0,9 толщины снимаемого припуска удаляется за счет анодного растворения и только 0,1 толщины – за счет резания.

После ЭХО детали из конструкционных сталей промывают в проточной холодной воде в течение 3–5 мин, а затем в проточной горячей воде при 330–350 К в течение 5–8 мин. Для защиты от коррозии детали пассивируют, например, в слабом растворе каустической соды при 330 К в течение 0,5–1 мин. Затем сушат и смазывают минеральным маслом. Детали из нержавеющих сталей, меди, латуни после ЭХО только промывают в проточной воде для удаления остатков электролита и загрязнений.

Контроль качества. Качество обработанных деталей после ЭФЭХ обработки должно соответствовать требованиям чертежа. Все обработанные поверхности подвергаются 100%-му контролю измерением специальными шаблонами или измерительным инструментом, обеспечивающим точность измерения ±0,005 мм. Контроль шероховатости обработанных поверхностей осуществляется несколькими способами: сравнением с эталонами шероховатостей поверхностей ГОСТ 9378–75 или при помощи измерения контактными и бесконтактными способами. Особенностью контроля качества деталей после ЭФЭХ обработки является контроль дефектного слоя. Глубина дефектного слоя зависит от режимов обработки.

При ЭЭО поверхность детали приобретает характерные неровности, а приповерхностный слой местами претерпевает физико-

химические изменения. Глубина дефектного слоя для стальных деталей при чистовой электроискровой обработке составляет 4–100 мкм, при черновой электроконтактной обработке –100–400 мкм. При глубине дефектного слоя более 100 мкм при ЭЭО в поверхностном слое деталей имеют место большие остаточные напряжения, приводящие к появлению микротрещин. При УЗО деталей из твердых сплавов и закаленных сталей в поверхностном слое также возникают остаточные напряжения, приводящие к появлению микротрещин.

При жестких режимах электронно-лучевой и лазерной обработки, когда в зоне действия луча присутствуют большие градиенты температуры, достигающие 10^8 К/м, в хрупких материалах возникают микротрещины. Контроль дефектного слоя проводят на образцах-свидетелях металлографическим способом при помощи микрошлифов, которые позволяют выявить микротрещины.

При необходимости получения более подробных сведений по физико-химическим основам ЭФ и ЭХО следует обратиться к учебному пособию [8] профессора Михайлова М.М. Там же приведены описания технологических операций обработки материалов указанными методами.

13.8. Термическая и химико-термическая обработка

При термической обработке происходят фазовые или структурные изменения в металле, что вызывает изменения его физико-механических свойств.

К процессам собственно термической обработки относятся: закалка, отжиг, отпуск, старение, нормализация, обработка холодом и др..

Помимо термической обработки рекомендуют также и химико-термическую обработку стальных деталей, при которой поверхность деталей становится твердой и износоустойчивой, а сердцевина сохраняется мягкой.

Химико-термическая обработка сопровождается физико-химическими процессами насыщения поверхности обрабатываемого материала, также изменяющими его физико-механические свойства. Наиболее распространенными способами химико-термической обработки являются цементация и азотирование.

Процесс цементации (насыщение поверхности деталей углеродом) может происходить в твердом (уголь, сода и др.) и жидком (в расплаве солей Na_2So_2 и NaCl, к которым добавляются 6–10% карбида кремния) карбюризаторах и газовой среде (метан, керосин, бензол в га-

зообразном состоянии). Толщина науглероженного слоя может доходить до 2,5 мм. В результате последующей термической обработки (закалка, нормализация) получают твердый поверхностный слой.

Цементация в твердом карбюризаторе применяется для деталей из стали с небольшим содержанием углерода.

Жидкостная цементация применяется как для малоуглеродистых сталей, так и для сталей со средним содержанием углерода. Особенностью процесса жидкостной цементации в цианистых солях является образование на поверхности детали, помимо науглероженного слоя, также и азотированного слоя. Благодаря азотированному слою поверхностный слой приобретает кроме повышенной твердости некоторые антикоррозионные свойства. После цементации детали закаливают.

Высокой износостойкости и коррозионной стойкости поверхности детали достигают при азотировании, представляющем собой процесс насыщения поверхности детали азотом в среде аммиака. Глубина азотированного слоя может достигать 0,8 мм. Антикоррозионному азотированию подвергают стали всех марок. Азотирование (нитрирование) применяют с целью: получения особо твердой поверхности; повышения усталостной прочности; повышения устойчивости против коррозии.

Для получения твердой поверхности азотированием необходимо применять стали, легированные алюминием, хромом и молибденом. Когда требуется высокая прочность, азотированию должна предшествовать закалка с высоким отпуском. Поверхности детали, не подлежащие азотированию, лудятся или покрываются специальной обмазкой. Процесс ведется в среде аммиака при температуре 480–650°С, причем чем выше температура, тем меньше твердость поверхности и большая глубина азотирования.

После азотирования детали следует шлифовать на глубину 0,02–0,03 мм и полировать для снятия наиболее насыщенного и хрупкого слоя.

Недостатками процесса являются ограниченность числа марок стали, подвергаемых азотированию, и значительная продолжительность процесса (12–72 ч.).

Антикоррозионному азотированию могут быть подвергнуты стали всех марок. Процесс ведется в среде аммиака. Он кратковременный и имеет широкий диапазон температур, например, 2–3 ч при t = 500°С; 20–60 мин при t = 600–750°С и 10–20 мин при t = 800–850°С.

Детали из высокоуглеродистых сталей после азотирования закаливаются; температура закалки определяется температурой процесса

азотирования. После закалки следует отпуск, причем, если температура отпуска высока, то его следует вести в атмосфере аммиака.

Кроме цементации и азотирования, применяют алититрование (процесс диффузионного насыщения стали алюминием), диффузионное насыщение хромом, кремнием, бором и другими элементами, цианирование (одновременное насыщение азотом и углеродом в расплаве, содержащем цианистые соли, или в газовой среде, соответствующей газовой цементации, с добавлением 25% аммиака).

Технологические требования к конструкции деталей и контроль их качества после термической и химико-термической обработки

К основным дефектам, возникающим при термической и химико-термической обработке, относятся трещины, внутренние напряжения в материале и коробление. Для предупреждения появления трещин в деталях рекомендуется не создавать резких переходов от толстых сечений к тонким. Для устранения коробления тонких деталей следует их форму конструировать с учетом возможности из установки и зажима в приспособлении для термической обработки. Детали с точными размерами, для которых операции термической обработки являются финишными, требуют подбора сплавов с незначительным увеличением объема после термической обработки.

Методы определения физических, химических и механических свойств материалов деталей, прошедших термическую обработку, разделяют на две группы: методы непосредственного определения свойств (к ним относятся измерение магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, электросопротивления, твердости, предела прочности, модуля упругости, коррозионной стойкости и т.д.); косвенные методы определения, основанные на существовании связи между структурным строением и свойствами материалов деталей (к ним относятся методы микро- и макроанализа).

Весьма распространенным, экономичным и достаточно оперативным методом контроля качества термообработки готовых деталей является замер их твердости, чаще всего по методу Роквелла. Для уменьшения расходов материала и уменьшения стоимости контроля деталей после термической обработки часто контролю подвергают не сами детали, а упрощенной формы и уменьшенных размеров детали-свидетели, подвергаемые термической обработке совместно с партией деталей.

Контрольные вопросы

1. Перечислите электрофизические и электрохимические методы обработки. В каких случаях следует применять эти методы обработки материалов?
2. Оборудование, инструмент, режимы и области применения электроискровой обработки. Достижимые точности обработки.
3. Операции, выполняемые методом электроискровой обработки.
4. Суть и область применения электронно-лучевой обработки. Недостатки метода.
5. Оборудование, режимы и области применения лазерной обработки. Достижимые точности обработки.
6. Оборудование, инструмент, режимы и области применения ультразвуковой обработки. Достижимые точности обработки.
7. Принцип электрохимической обработки.

Глава XIV. ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

14.1. Общие положения

Покрытие – это слой одного материала или несколько слоев различных материалов, последовательно нанесенных на поверхность детали для придания поверхностному слою некоторых свойств, отличных от свойств основного материала, например, электропроводности, электроизоляционных свойств, твердости, паяемости, износоустойчивости, магнитных свойств, антикоррозионных свойств, декоративности и др. Покрытия наносят на металлы, керамику, стекло и пластмассу толщиной от десятых долей до нескольких сотен микрометров. В качестве материалов покрытий используются металлы, оксиды, соли металлов, пластмассы, лаки и краски.

Выбор вида покрытия и его толщины определяется материалом и назначением детали, особенностями технологии ее изготовления и условиями эксплуатации. Например, для умеренного климата и промыш-

ленной атмосферы различают следующие условия эксплуатации: легкие (Л) – в закрытых помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями; средние (С) – в закрытых помещениях без искусственно регулируемых климатических условий; жесткие (Ж) – на открытом воздухе или под навесом. Очень жесткие (ОЖ) – условия эксплуатации для умеренного климата соответствуют эксплуатации изделий на открытом воздухе или под навесом в морской атмосфере. Так, покрытия для улучшения электропроводности с одновременной защитой от коррозии целесообразно выполнять: для условий Л – никелем толщиной 3 мкм, для условий С и Ж – серебром толщиной, соответственно, 6 и 9 мкм. Один и тот же вид покрытий часто применяют для различных целей. Никелевые и хромовые покрытия применяют как для защитно-декоративного покрытия, так и для повышения поверхностной твердости детали, работающей в условиях трения.

При выборе материала металлических защитных покрытий стремятся не допустить образования гальванических пар, вызывающих коррозию основного металла детали.

В качестве материала металлических покрытий используют **медь** толщиной 3–25 мкм – для создания токопроводящих элементов на электроизоляционных материалах, а также для образования подслоя на металлических деталях, в первую очередь, на стальных, перед нанесением других покрытий для повышения прочности сцепления многослойного покрытия с основным материалом; олово и его сплавы толщиной 10–60 мкм – для подготовки поверхностей к пайке или герметизации узла, а также для защиты деталей от коррозии; **серебро и его сплавы** толщиной 3–6 мкм – для повышения электропроводности и паяемости; **золото** – толщиной 2–5 мкм – для защиты от коррозии в агрессивных средах, повышения электропроводности и теплопроводности; **палладий** толщиной до 3 мкм – для защиты электрических контактов от электроэрозии, повышения износостойкости; **хром** толщиной от 0,5 до 100 мкм – для защиты от коррозии, повышения жаростойкости, износостойкости и твердости; **никель** толщиной 5–35 мкм – для защитно-декоративных целей; **кадмий** толщиной 1–50 мкм – для защитных покрытий, работающих при трении и деформациях; **цинк** толщиной 7–15 мкм – для защиты от коррозии.

Для получения окисных защитных пленок на черных и цветных металлах используются щелочные или кислотные растворы сложного состава, которые взаимодействуют с основным материалом детали и образуют покрытие. Для получения фосфатных покрытий применяют

многокомпонентные солевые растворы. Толщина пленок: окисных – 6 мкм, фосфатных – 0,5–25 мкм.

В зависимости от свойств основного материала детали и технологических условий образования пленок окисные и фосфатные покрытия могут выполнять разнообразные функции, например, изоляционные, защитно-декоративные, смазывающие и др.

Покрытия из пластмасс наносят на детали из металла, тканей, бумаги, стекла с целью антикоррозионной защиты, влагозащиты, декоративной отделки, повышения химической стойкости, износостойкости. Для этого используют соединения поливинилхлоридных смол с пластификаторами, фторопластом и др.

Для нанесения металлических покрытий используют следующие методы: методы химического осаждения из растворов, горячего погружения детали в расплав, вакуумного испарения, катодного распыления, электронно-лучевого напыления и гальванические. Оксидные и фосфатные покрытия получают методами анодного окисления в электролите, химической и электрохимической обработкой в солевых растворах. Пластмассовые покрытия получают путем окунания в холодный жидкий компаунд или в горячий расплав, пульверизацией суспензии на поверхность детали, помещением нагретой детали в псевдосжиженный слой полимерного порошка, осаждением из газовой фазы, газоплазменным или электростатическими методами, плакированием плоских деталей. Лакокрасочные покрытия выполняют пневматическим и электростатическим распылением, струйным обливом, нанесением в псевдокипящем слое порошковых лакокрасочных материалов.

Для обозначения вида покрытия и краткой его характеристики в конструкторской и технологической документации принята буквенно-цифровая система. Для металлических покрытий буквы указывают металл покрытия, цифра после буквы – его толщину в микрометрах и буквы в конце шифра – дополнительные характеристики покрытия или характер дополнительной обработки (например, М30.Н18.Х.б – трехслойное покрытие в микрометрах: медь – 30, никель –18, хром – 1, б – блестящее; Ц18. хр. – цинковое покрытие толщиной 18 мкм с хроматной пассивацией). В шифрах химических покрытий буквы указывают метод получения и характер дополнительной обработки (например, Хим. Окс. лкп – окисное покрытие, нанесенное химическим способом с дополнительным лакокрасочным покрытием; Ан. Окс. черн. – окисное покрытие, нанесенное анодизационным способом, окрашенное в черный цвет).

14.2. Структура технологических процессов формирования химических и гальванических покрытий деталей приборов и содержание основных операций

Для нанесения химических покрытий на поверхности металлических деталей приборов широко применяют методы оксидирования (химического и электрохимического), пассивирования и фосфатирования.

Оксидирование – процесс получения на черных и цветных металлах оксидных пленок путем химической обработки в растворах щелочей и кислот. Получение оксидной пленки электрохимическим способом называется анодированием.

Пассивирование – процесс получения очень тонких окисных пленок на углеродистых сталях, цветных металлах и сплавах с использованием окислов хрома.

Фосфатирование – процесс получения на металлах пленок нерастворимых фосфорнокислых солей цинка, бария и цинка, магния и цинка, железа путем химической обработки в многокомпонентных растворах солей.

Металлические покрытия наносят преимущественно гальваническим методом, основу которого составляют процессы осаждения металлов при электролизе водных растворов солей.

Если в ванну с электролитом подвести постоянный электрический ток, то в электролите возникнет движение ионов и начинает идти ток. Ионы, имеющие положительный заряд, называют катионами. Под действием электрического потенциала они перемещаются к отрицательному электроду (катоду) и осаждаются на нем. На катоде выделяются металлы и водород. Ионы, имеющие отрицательный заряд (ионы металлоидов и кислотных остатков), называются анионами. Они под действием электрического потенциала перемещаются к положительному электроду (аноду) и растворяют его.

Таким образом, при гальванических покрытиях катодами – **К** служат детали, на которых осаждается металл покрытия, а анодами **А** – пластины металла покрытия (рис. 14.1). В некоторых гальванических ваннах, например, в ваннах хромирования, применяют нерастворимые аноды – свинец, уголь, платину и др.

Технологические процессы формирования покрытий перечисленными методами состоят из следующих этапов:

- подготовка деталей,
- нанесение покрытия,
- очистка деталей с покрытиями от остатков технологических сред.

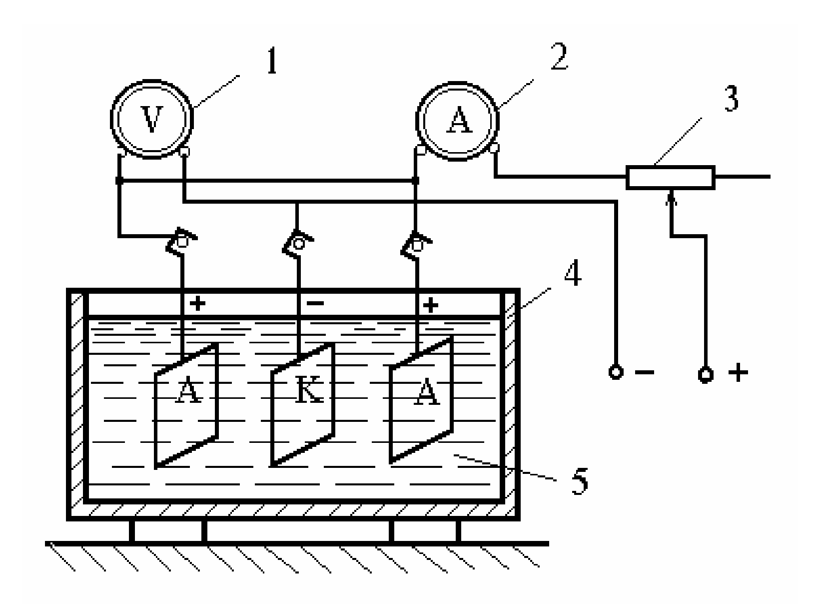


Рис. 14.1. Схема установки для гальванического покрытия металла:
1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – реостат; 4 – ванна; 5 – электролит

Подготовка деталей для нанесения покрытий заключается в удалении с их поверхностей окисных пленок и поверхностных дефектов (заусенцев, сварочных брызг, острых кромок и т.п.); в очистке поверхностей от жировых и других органических загрязнений; в изоляции мастиками, пленками и накладками тех поверхностей, на которые не будут наноситься покрытия; в монтаже деталей в приспособлениях (при необходимости).

Этап нанесения покрытий, кроме основных операций, содержит большое количество операций промывки и сушки, очистки поверхностей от остатков технологических составов при переходе от выполнения одной операции нанесения к другой, а также содержит операции нанесения технологических межоперационных защитных покрытий и удаления их после использования.

Этап очистки деталей с покрытиями от остатков технологических сред содержит операции промывки и сушки. Если принять трудоемкость всего технологического процесса нанесения покрытий за 100%, то трудоемкость технологических операций очистки и подготовки поверхности, выполняемых на всех этапах, составляет 80%. Выполнение основных операций нанесения некоторых видов покрытий проводят с использованием следующих растворов и режимов.

Анодирование деталей из алюминия и его сплавов проводят, например, в сульфасалициловом электролите следующего состава: серная кислота 2–4 г/л, щавелевая кислота 27–33 г/ л, сульфасалициловая ки-

слота 90–110 г/л. Температура электролита 291–301 К, плотность тока 150–300 А/м^2, напряжение до 110 В, продолжительность обработки 20–120 мин.

Пассивирование деталей из меди и ее сплавов осуществляют в растворе со следующим составом: натрий (калий) двухровомокислый 90–130 г/ л, кислота серная 15–25 г/л. Процесс протекает при температуре раствора 288–303 К, продолжительность обработки 15–30 мин.

Пассивирование стальных деталей после травления с целью межоперационной защиты перед механической обработкой (например, шлифованием) проводят в следующем растворе: натрия нитрит 5–11 г/л, натрия карбонат 2–4 г/л. Температура и продолжительность процесса соответственно 338–348 К и 0,5–1 мин.

Фосфатирование деталей 6–7 квалитетов точности из углеродистых, низко- и среднеуглеродистых сталей проводят в растворе следующего состава: цинк азотнокислый 10–20 г/л, монофосфат цинка – 60–70 г/л, натрий азотнокислый 0,2–1 г/л. Температура раствора 288–303 К, продолжительность фосфатирования 15–25 мин.

Серебряное покрытие на деталях из меди и ее сплавов, а также на деталях с медным покрытием производят гальваническим методом в цианистом и бесцианистом электролитах. Состав цианистого электролита: серебро азотнокислое (в пересчете на металл) 20–30 г/л, калий цианистый (свободный) 20–40 г/л, калий углекислый 20–30 г/л.. Процесс серебрения выполняется при pH среды 11–12, температуре электролита 291–303 К, плотности тока 20–150 А/м^2, скорости осаждения 0,15–0,75 мкм/мин. Состав бесцианистого электролита: серебро азотнокислое (в пересчете на металл) 25–30 г/ л, калий углекислый 25–30 г/л, калий железистосинеродистый 50–80 г/ л. Условия серебрения в бесцианистом электролите: pH среды 3,5–5,0, температура электролита 291–303 К, плотность тока 30–50 А/ м^2 , скорость осаждения покрытия 0,15–0,25 мкм/ мин.

Промывку деталей после нанесения покрытий осуществляют сначала в проточной горячей воде при 323–333 К в течение 0,5–1 мин, а затем в холодной проточной воде в течение 0,5–1 мин.

Сушку деталей сложной конфигурации производят обдувкой сжатым воздухом, нагретым до 288–303 К. Детали, обрабатываемые на подвесках в стационарных ваннах или в автоматических линиях, сушат в сушильном шкафу или в сушильной камере с циркуляцией нагретого до 385 К воздуха в течение 3–10 мин.

14.3. Формирование покрытий с особыми физико-химическими свойствами методом электронно-лучевого напыления

Получение пленочных материалов и покрытий методом электронно-лучевого напыления особенно перспективно при изготовлении деталей радиоэлектронной аппаратуры. Сущность метода поясняется принципиальной схемой, представленной на рис. 14.2. Материалы по-

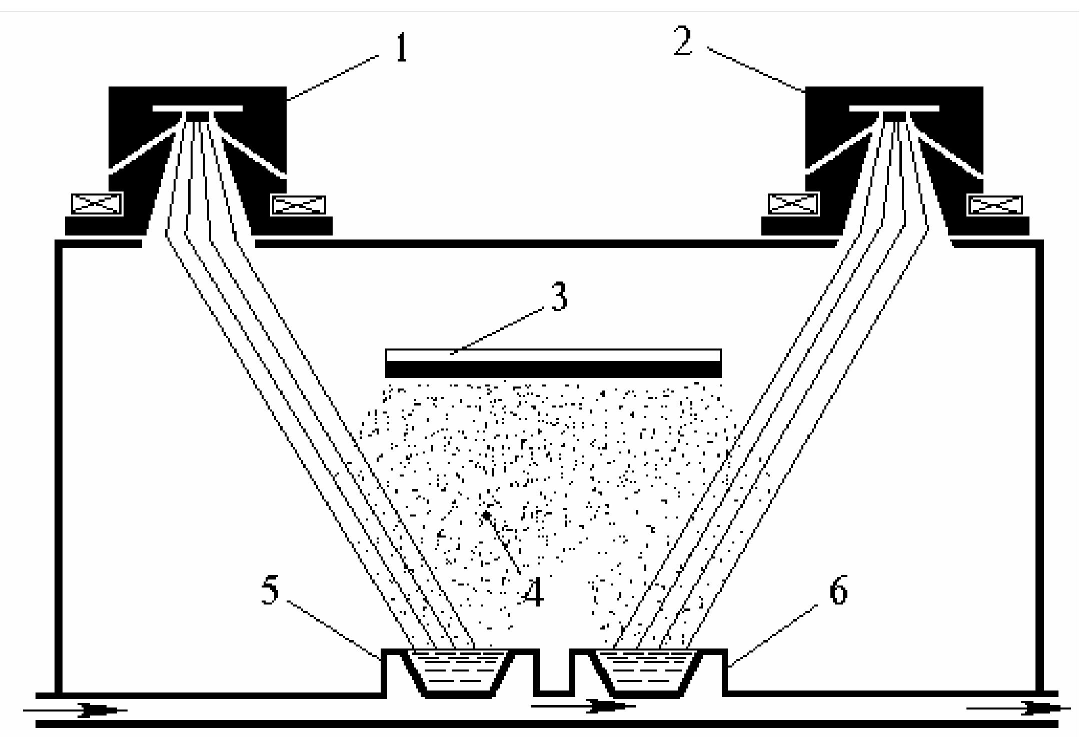


Рис. 14.2. Схема установки для электронно-лучевого напыления различных материалов

мещают в вакуумную камеру и с помощью электронного луча нагревают до плавления, а затем до испарения. Испаряемый атомарно-молекулярный поток 4 в условиях вакуума перемещается прямолинейно с большой кинетической энергией, встречаясь с относительно холодной подложкой 3, конденсируется на ее поверхности в виде тонкого слоя.

Испаряемый материал находится в медном охлажденном тигле 5, 6. Современные мощные средства вакуумной техники и мощные электронно-лучевые пушки 1 и 2 позволяют испарять все металлы и некоторые неметаллические материалы такие, как карбиды, оксиды, бориды и осуществлять их конденсацию со скоростью 10–200 мкм/мин.

Структура и свойства конденсированного слоя в значительной мере зависят от температуры подложки, на которой происходит конденсация. Установлено, что конденсированная пленка в зависимости от температуры подложки имеет три характерные структурные зоны: низ-

котемпературную, полученную в интервале от комнатных температур, до граничной температуры T_1, равной примерно 0,3 температуры плавления $T_{пл.}$ испаряемого вещества; промежуточную – между T_1 и T_2, где T_2 равна 0,45–0,5 $T_{пл.}$; высокотемпературную – выше T_2.

Каждая из этих зон имеет свою специфическую структуру и физико-химические свойства. Пленки первой зоны, как правило, пористы, обладают высокой твердостью, низкой плотностью и пластичностью. Свойства второй зоны приближаются к свойствам литых материалов, пористость практически исчезает. Пленки в третьей зоне имеют равноосную структуру, обладают низкой твердостью, высокой плотностью и пластичностью. Температура подложки оказывает существенное влияние на адгезию пленок. При конденсации пленок на подложки без подогрева, как правило, адгезия плохая. Наилучшая адгезия для пленок толщиной более 1 мкм наблюдается во второй температурной зоне. Кроме того, свойства пленок зависят от их толщины и от скорости конденсации. Таким образом, регулируя температуру подложки, скорость конденсации и толщину конденсата, можно получать пористые и беспористые материалы, различные структурные элементы в многофазных сплавах, тем самым в широких пределах изменять такие свойства, как удельное электросопротивление, коэрцитивную силу, теплопроводность, микротвердость и т.д.

Имеют место две области применения этого метода. Первым методом получают различного рода покрытия толщиной от десятых долей микрометра до миллиметра на полуфабрикатах и готовых изделиях. Покрытия могут быть защитными, низкоомными, высокоомными, износостойкими, жаросойкими и т.д. Вторым методом получают полуфабрикаты или изделия непосредственно из паровой фазы. Примерами таких изделий являются фольги, листы, мембраны, экраны, трубки или другие изделия сложной конфигурации. Толщина конденсированных слоев достигает 2 мм.

Антикоррозионные покрытия (никелем, серебром, кадмием, цинком и др.), полученные электронно-лучевым испарением, имеют более высокое качество по сравнению с покрытиями, изготовленными гальваническим способом. Более высокое качество достигается за счет плавления материала покрытия в вакууме. Например, перечисленные выше факторы позволили снизить толщину покрытия на медной ленте с 12 до 2 мкм, при одновременном повышении качества покрытия.

Для получения готовых изделий сложной конфигурации непосредственно из паровой фазы используют форму детали – подложку, на

которую конденсируется испаряемый материал, повторяя полностью ее конфигурацию.

Для легкого отделения готового тонкопленочного изделия от подложки на последнюю предварительно наносится антиадгезив, имеющий хорошую адгезию с подложкой, но совершенно не взаимодействующий с напыляемым материалом. Таким способом изготавливают тонкостенные изделия достаточно сложной формы, сочетающие плоские, выпуклые и вогнутые участки, из материалов на основе карбида и диборида титана. Например, высокомодульные металлические диафрагмы для громкоговорителей, работающих на частотах до 35–40 кГц (рис. 14.3). Толщина изделий – 10–20 мкм. Подложки изготавливают точно по форме будущего изделия из нержавеющей стали или меди. В качестве антиадгезива напыляют, например, слой MgF_2 толщиной 1–2 мкм.

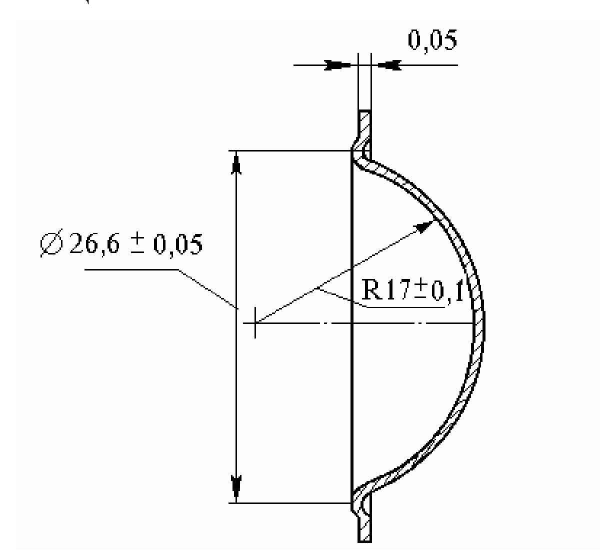


Рис. 14.3. Металлическая диафрагма для громкоговорителей

Таким образом, метод электронно-лучевого напыления позволяет повысить качество, надежность, уменьшить массу и габариты изделий, получить материалы с особыми, заранее заданными физико-химическими свойствами. Кроме того, электронно-лучевое напыление – экономичный, высокопроизводительный процесс, легко поддающийся автоматизации и программному управлению, а также обеспечивающий охрану окружающей среды и хорошие санитарные условия для работников.

14.4. Структура технологического процесса лакокрасочных покрытий и содержание основных операций

Технологический процесс нанесения лакокрасочных материалов включает следующие основные этапы: подготовку поверхности, окраску, сушку и отделку окрашенной поверхности.

Подготовка поверхности под окраску включает операции очистки, выравнивания, грунтовки и шпатлевки с последующим шлифованием. Поверхность изделия очищают химическим (обезжиривание, травление и т.д.) или механическим (шлифование, галтовка, струйная

абразивная и гидравлическая обработка и т.д.) способами. В ряде случаев для повышения стойкости против коррозии в жестких и особо жестких условиях изделия предварительно фосфатируют (черные металлы) или оксидируют (цветные металлы). Затем для улучшения адгезии материала покрытий с поверхностью изделия и придания дополнительной коррозионной защиты на поверхность наносят слой грунта толщиной 0,02–1 мм. Применяют лакомасляные, битумомасляные, нитро- и водоразбавленные грунты. В тех случаях, когда к покрытию предъявляются повышенные требования по внешнему виду, а поверхность изделия имеет дефекты, загрунтованные поверхности подвергают шпатлевке. Применяют клеевые, масляные, лаковые, нитроцеллюлозные, перхлорвиниловые и эпоксидные шпатлевки.

После сушки неровности зашпатлеванной поверхности изделия шлифуют механизированным инструментом. Рельеф поверхности деталей, покрываемых лакокрасочными материалами, во многом определяет расход и толщину покрытия. Толщина защитных покрытий должна превышать максимальную высоту микронеровностей не менее, чем на 20%. Приемлемой считается шероховатость покрываемой поверхности, равная или меньшая Rz 40 мкм.

Окраску поверхности изделия жидкими лакокрасочными материалами производят одним или несколькими слоями следующими способами: пневматическим, электростатическим и безвоздушным распылением, струнным обливом, ручными способами (окраска валиками, кистью и др.). Наиболее совершенным способом окраски является электростатическое распыление. При покраске в электростатическом поле (рис. 14.4) краску подают воздушным распылителем 1 на изделие 2, движущееся по конвейеру 3 между электродами-катодами 4.

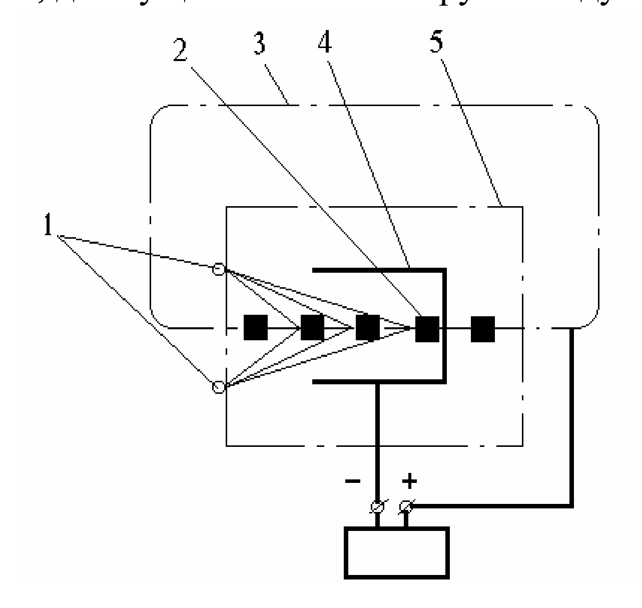


Рис. 14.4. Схема оборудования для окраски изделия в электростатическом поле:
1 – воздушный распылитель,
2 – изделие,3 – конвейер,
4 – катод, 5 – камера

Образующееся в камере 5 электростатическое поле заряжает частицы краски, которые следуют по силовым линиям электростатического поля к изделиям. Потери краски составляют менее 5%. При этом способе улучшается качество окраски, уменьшаются потери краски, резко повышается производительность труда, создаются условия комплексной автоматизации процесса окраски, и значительно улучшаются условия труда. Различные способы использования электростатического поля высокого напряжения для окраски деталей показаны на рис. 14.5.

Сушку лакокрасочных покрытий выполняют для отверждения последних. Различают естественное и искусственное отверждение. Естественное отверждение покрытия производится на открытой площадке или под вытяжным зонтом в помещении. Этот вид отверждения длителен и не приемлем при поточных способах окраски. Покрытия получаются недостаточно высокого качества. Искусственное отверждение покрытия осуществляется в сушильных шкафах, рефлекторных сушилках с помощью инфракрасных лучей, а также потоком электронов (радиационное отверждение) в диапазоне температур 323–720 К.

При выборе способа и режима отверждения покрытий учитывают многие факторы: вид лакокрасочного материала, характер покрываемой поверхности детали, ее размеры и конфигурацию, поточность производства и др. Предпочтение отдают тем способам, которые экономически целесообразны, высокопроизводительны, требуют меньших затрат труда и материалов и обеспечивают при этом лучшее качество лакокрасочных покрытий.

Порошковые полимерные покрытия

Для получения покрытия путем напыления применяют различные термопластичные полимеры в виде порошков (полиэтилен высокого и низкого давления, полипропилен, полиамиды, поливинилбутираль, фторопласты, пенопласт), а также композиции на основе термореактивных смол, в частности эпоксидных, полиэфирных и полиакриловых.

Так как многие полимеры имеют отдельные недостатки (высокая вязкость расплавов, недостаточная адгезия, механическая прочность и т.д.), при разработке порошковых полимерных композиций в их состав кроме полимера вводят свето - и термостабилизаторы, наполнители, пигменты, отвердители, структурирванные добавки, поверхностно-активные вещества и т.д.

Формирование покрытий из порошковых материалов заключается в оплавлении частиц порошка в неразрывную (сплошную) пленку, соединенную с поверхностью изделия силами адгезии.

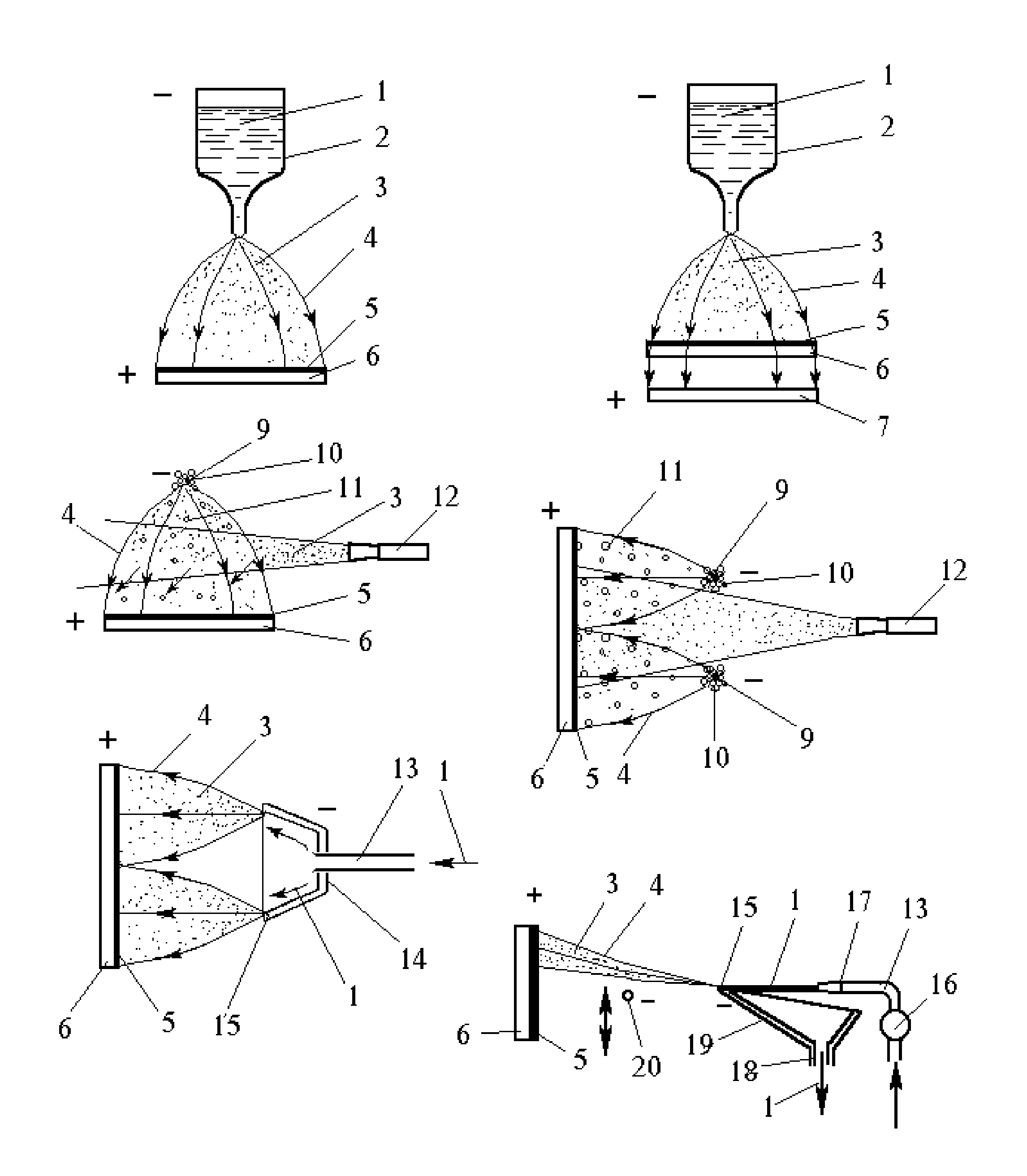


Рис. 14.5. Различные способы использования электростатического поля высокого напряжения для окраски деталей:

1 – краска; 2 – воронка; 3 – распыленная краска; 4 – силовые линии электрического поля; 5 – пленка краски; 6 – металлическая деталь; 7 – диэлектрическая деталь; 8 – электрод; 9 – коронирующий электрод; 10 – чехол короны; 11 – анионы воздуха; 12 – распылитель краски; 13 – краскопровод; 14 – вращающаяся чашка; 15 – распыляющая кромка; 16 – насос; 17 – сопло; 18 – труба для слива избытка краски; 19 – лоток; 20 – направляющий электрод

Свойства покрытий зависят не только от исходного состава материала, но и от подготовки поверхности изделий, условий формирования покрытий с включением режимов охлаждения. Подготовка поверхности включает удаление окалины, ржавчины, жировых и других загрязнений, а также получение поверхности с определенными параметрами шероховатости. Температурно-временной режим формирования покрытия выбирают в зависимости от теплоемкости изделий, способа нанесения покрытий, и природы полимера.

14.5. Контроль качества покрытий

При контроле качества металлических и неметаллических неорганических покрытий по ГОСТ 16875–71 проверяют внешний вид, толщину, пористость и прочность сцепления покрытия.

Контроль внешнего вида покрытия производят путем внешнего визуального осмотра в помещении с освещенностью не менее 300лк, а ответственные детали – через лупу десятикратного увеличения. Контроль толщины покрытия осуществляется различными методами: физическими неразрушающими методами (магнитным, электромагнитным и др.); физическими разрушающими методами (капли, струи, снятия); электрохимическими методами (например кулонометрическим). Наиболее производительными методами являются магнитный и электромагнитный.

Контроль пористости покрытия производят методами наложения паст и фильтровальной бумаги. При использовании соответствующих реактивов на испытуемой поверхности покрытия или фильтрующей бумаги, которую приводили в соприкосновение с покрытием, подсчитывают число окрашенных участков, соответствующих числу пор.

Контроль прочности сцепления покрытий осуществляют следующими методами: полирования, крацевания, нагрева, навивки, нанесения сетки царапин, изгиба. После контроля этими методами не должны наблюдаться вздутия и отслаивания покрытия.

Контрольные вопросы

1. Назначение покрытий в приборостроении.
2. Какие виды покрытий применяются в приборостроении?
3. Химические покрытия. Способ нанесения.
4. Электрохимические покрытия. Способ нанесения.
5. Электронно-лучевое напыление металлов.
6. Методы нанесения лакокрасочных покрытий.
7. Подготовка поверхностей к нанесению покрытий.

Глава XV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

15.1. Соединение деталей сваркой и пайкой

Сварка – процесс получения неразъемного соединения заготовок за счет сил межатомного или межмолекулярного сцепления между свариваемыми частями при их местном нагреве, пластическом деформировании или совместном действии того и другого. Суть процесса соединения материалов заготовок методом сварки заключается в создании условий, при которых начинают действовать силы межатомного сцепления. Сварке могут подвергаться не только металлы, но также стекло, пластмассы и другие материалы.

Сварка позволяет обеспечить получение соединений вакуумноплотных, коррозионно-стойких и равнопрочных с основным материалом. Сварочной другой можно наплавлять на заготовку слои металла различной толщины. В настоящее время существует большое число видов сварки, которые классифицируют по физическим, техническим и технологическим признакам.

По физическим признакам сварку подразделяют на термическую (дуговую, электрошлаковую, электронно-лучевую, плазменную, газовую и др.); термомеханическую (контактную, диффузионную, прессовые виды сварки) с использованием давления и тепловой энергии; механическую (холодную, взрывом, ультразвуком, трением и др.) с использованием механической энергии и давления.

По техническим признакам различают сварку по способу защиты металла в зоне сварки, непрерывности процесса, степени механизации, типу защитного газа.

Технологические признаки устанавливают для каждого вида сварки. Сварные соединения нашли широкое применение в приборостроении благодаря возможности автоматизации процесса, невысокой трудоемкости процесса, простоте получения сложных конструкций из отдельных деталей и меньшей стоимости конструкции по сравнению с другими способами неразъемных соединений.

Использование того или иного вида сварки в каждом конкретном случае определяется габаритами свариваемых заготовок, их материалами и конструктивными особенностями, требованиями к неизменности свойств материала заготовок после сварки, допустимым объемом расплавленного металла и др. Важнейшими показателями технологиче-

ских возможностей методов сварки являются наименьшая площадь нагрева и наибольшая плотность энергии (табл. 15.1).

Поперечное сечение сварного соединения (шва), выполненного электродуговой сваркой, изображено на рис. 15.1, где 1 – сварной шов, материал которого образован плавлением основного материала и плавящего электрода; 2 – зона плавления основного материала и материала шва; 3 – зона термического влияния, в которой основной материал не претерпел плавления, но на отдельных участках под действием нагрева и охлаждения изменил свойства и структуру; 4 – зона основного металла с исходными свойствами и структурой.

Таблица 15.1

Сравнительные характеристики некоторых видов сварки плавлением

Вид сварки	Наименьшая площадь нагрева, м^2	Наибольшая плотность энергии, Вт/м^2
Газовая	10^{-6}	5×10^{8}
Электродуговая	10^{-7}	10^{9}
Электронно-лучевая	10^{-11}	5×10^{12}
Лазерная	10^{-11}	5×10^{12}

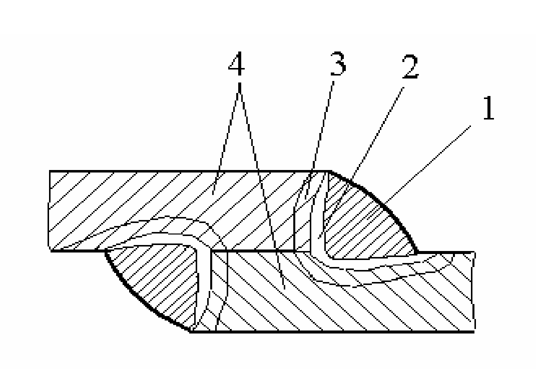


Рис. 15.1. Структура поперечного сечения сварного шва

Свойства сварного соединения зависят от химического состава и исходных свойств свариваемых материалов и режима сварки. Наибольшие трудности обеспечения качественного сварного соединения вызывает сварка заготовок из разнородных материалов. Хорошая свариваемость плавлением достигается, если свариваемые разнородные материалы образуют между собой неограниченные твердые растворы. В этом случае в шве отсутствуют хрупкие составляющие, ухудшающие механические свойства и электропроводность. При сварке материалов с ограниченной растворимостью качественный шов получают только при определенных технологических приемах (медленное

охлаждение, соответствующие присадочные материалы и т. д.). Если разнородные материалы заготовок образуют химические соединения, то сварку плавлением применять не рекомендуется из-за наличия в сварном шве интерметаллидов, которые резко изменяют физико-химические свойства соединения: повышают твердость и склонность шва к трещинообразованию, снижают пластичность, теплопроводность, электропроводность и т. д. Для сварки таких деталей используют методы сварки давлением, например – ультразвуковую сварку, диффузионную с промежуточной прослойкой, материал которой создает твердые растворы с материалом заготовок.

Режим сварки характеризуется комплексом параметров. Для различных видов сварки этот комплекс неодинаков. Например, параметрами электродуговой сварки являются: диаметр электрода $d_{эл}$, сварочный ток $I_{св}$, напряжение дуги $U_д$, скорость сварки $V_{св}$ и скорость охлаждения шва $V_{о\ ш}$.

К параметрам режима электронно-лучевой сварки относятся: расстояние пушки до изделия l и до фокусировки b, сила тока пучка $I_п$, ускоряющее напряжение $U_{уск}$; давление (вакуум) р и скорость сварки $V_{св}$.

Для характеристики режима ультразвуковой микросварки проводников к пленкам используют следующий комплекс параметров: давление электрода-инструмента, частота и амплитуда колебаний инструмента, температура предварительного подогрева заготовок, время выдержки свариваемых заготовок под действием давления и колебаний.

Исходными данными для выбора вида сварки и режимов являются: материал заготовок, размеры и конструктивные особенности заготовок, эксплуатационные требования к свойствам сварного соединения. Область использования видов сварки приведена в табл. 15. 2.

24.2. Виды сварки

Газовая сварка относится к термическим методам сварки. Она основана на плавлении соединяемых металлических кромок. Плавление происходит за счет воздействия газового пламени. Чаще всего применяют ацетилено-кислородное пламя, поскольку оно обладает наиболее высокой температурой по сравнению с пламенем любого другого газа. На современных предприятиях ацетилен и кислород подаются в газовых баллонах и специальных емкостях. Однако на мелких предприятиях ацетилен можно получить при соединении воды с карбидом. Ацетиленовая установка взрывоопасна, и обычно избегают ее применения.

При газовой сварке (рис. 15.2) деталей 1 и 6 свариваемые кромки расплавляются под воздействием факела пламени 4, в результате чего образуется сварочный шов 3. Для улучшения его свойств вводят присадочный материал 2. Пламя при сгорании ацетилена образуется на выходе горелки 5, в которую подают кислород и ацетилен.

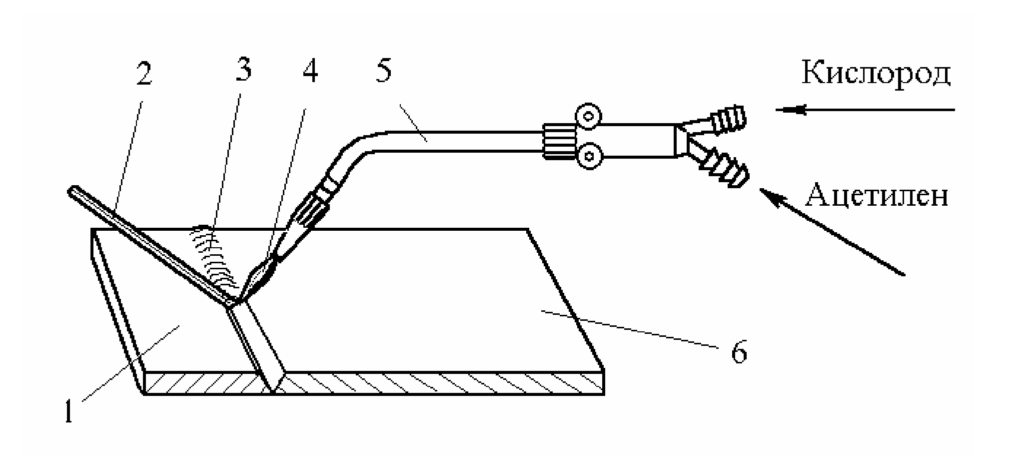


Рис. 15.2. Газовая сварка

Таблица 15.2

Преимущественное использование основных видов сварки при изготовлении деталей и узлов радиоэлектронной аппаратуры

Вид сварки	Свариваемые материалы	Толщина заготовок, мм	Область использования
1	2	3	4
Газовая	Сталь, медные сплавы, сплав АМц и другие	0,5–2	Изготовление деталей несущих систем приборов и РЭА, нечувствительных к резкому и неравномерному нагреву
Электродуговая	Стали, цветные металлы и их сплавы	1,5–15	Изготовление деталей несущих систем и электромонтажных элементов РЭА
Микроплазменная	Свариваемые металлы и сплавы, в том числе тугоплавкие	10^{-2}–1	Изготовление миниатюрных деталей конструктивной базы и выполнение электромонтажных соединений в вакууме

Продолжение табл. 15.2

1	2	3	4
Электронно-лучевая	Высокопрочные тугоплавкие активные свариваемые материалы	10^{-2}–10^{2}	Изготовление миниатюрных деталей конструктивной базы и выполнение электромонтажных соединений в вакууме
Лазерная	Большинство свариваемых материалов, в том числе непроводники	10^{-2}– 5	Изготовление миниатюрных деталей конструктивной и схемотехнической баз в любой прозрачной среде для лазерного излучения
Контактная	Токопроводящие материалы	10^{-2}–5	Изготовление деталей конструктивной базы и электромонтажных соединений, не требующих миниатюризации. Изготовление миниатюрных деталей при стабильных режимах
Термокомпрессионная микросварка	Пластичные материалы	10^{-2}–0,1	Получение электромонтажных соединений в элементах схемотехнической базы микроэлектроники
Ультразвуковая микросварка	Металлы, полимеры, металлизированная керамика	10^{-2}–0,1	Получение конструктивных и электромонтажных микросоединений

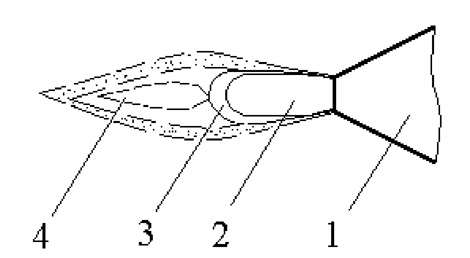


Рис. 15.3. Факел газового пламени

Пламя по температуре неоднородно (рис. 15.3). На выходе из наконечника горелки 1 образуется ядро 2. На расстоянии 2–6 мм в зоне 3 температура достигает 3150°С. В зоне 4 содержится кислород и азот воздуха.

К недостаткам газовой сварки относятся: низкая производительность; весьма повышенная зона термического воздействия, что вызывает деформации свариваемых конструкций; необходимость

высокой квалификации сварщика, так как качество сварки прямо зависит от расположения горелки, траектории и скорости ее движения, подачи присадочного материала. К преимуществам газовой сварки относятся простота применяемого оборудования и инструмента, возможность выполнения сварочных работ в различных условиях, возможность автономного питания газами.

Дуговая сварка также относится к термическому классу сварки. Дуговая сварка – один из видов сварки плавлением, которое осуществляется с помощью электрической дуги. Электрическая дуга – мощный электрический разряд, возникающий в воздушном (газовом) промежутке между электродом и изделием. В результате воздействия дуги 4 (рис. 15.4) образуется сварочная ванна 2. После отвода электрода 3 сварочная ванна застывает, образуется сварочный шов, соединяющий детали 1. Дуга возникает в связи с тем, что электрод 3 и свариваемые детали 1 подключены к достаточно мощному источнику питания, которым служит сварочный трансформатор. Сварка может производиться плавящимся и неплавящимся электродом.

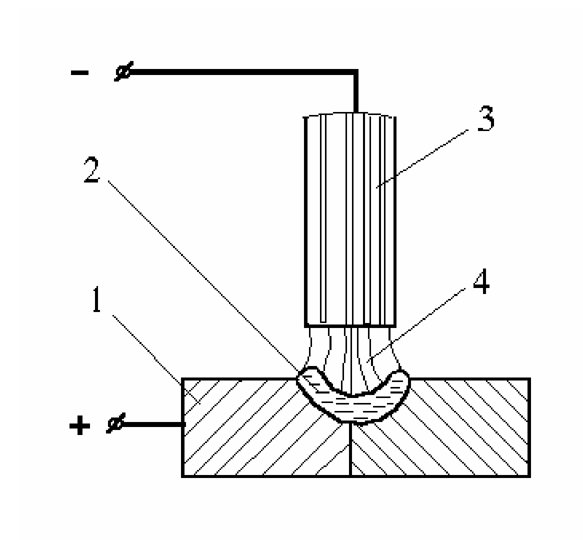


Рис. 15.4. Электродуговая сварка

Плавящийся электрод по мере его уменьшения подается сварщиком в дугу (зону сварки). При этом стараются обеспечить постоянную длину дуги для получения равномерного сварочного шва. Сварочная ванна в этом случае образуется за счет плавления сварочных кромок металла и расплавленного металла электрода. Для защиты от воздействия внешней среды и улучшения состава сварочной ванны ее часто защищают специальными веществами, которые расплавляются в процессе сварки. Вещества эти вводят в обмазку электродов.

Неплавящийся электрод (угольный, графитовый или вольфрамовый) участвует только в образовании электрической дуги. Добавки могут подаваться со стороны в район сварочной ванны. Защита металла от внешней среды при дуговой сварке может осуществляться с помощью

покрытого электрода либо при сварке его под флюсом, а также при сварке в среде защитных газов.

Покрытый электрод (с обмазкой) представляет собой металлический стержень с нанесенными на его поверхность порошкообразными материалами на клеящем растворе. При сварке под флюсом всю зону сварки покрывают порошкообразным слоем флюса, который защищает расплавленный металл от окружающей среды и улучшает качество шва. Дуговая сварка под слоем флюса выполняется полуавтоматами и автоматами. Сварка в среде защитных газов (рис. 15.5) производится как плавящимся, так и неплавящимся электродом. Здесь для соединения деталей 7 и 9 образуют сварочную ванну 6 с помощью электрической дуги, возникающей между электродом 2 и свариваемыми деталями. С этой целью их присоединяют с помощью проводов 1 и 10 к электрическому источнику питания. Вокруг электрода имеется кожух 3, внутрь которого подают защитный газ 5. При сварке газовое облако защищает сварочную ванну, обеспечивая весьма высокое качество сварного шва, что обусловило широкое применение этого вида сварки в авиастроении. Как при газовой сварке, здесь также важно следить за зоной прогрева 8, в которой могут произойти нежелательные структурные изменения при нагреве.

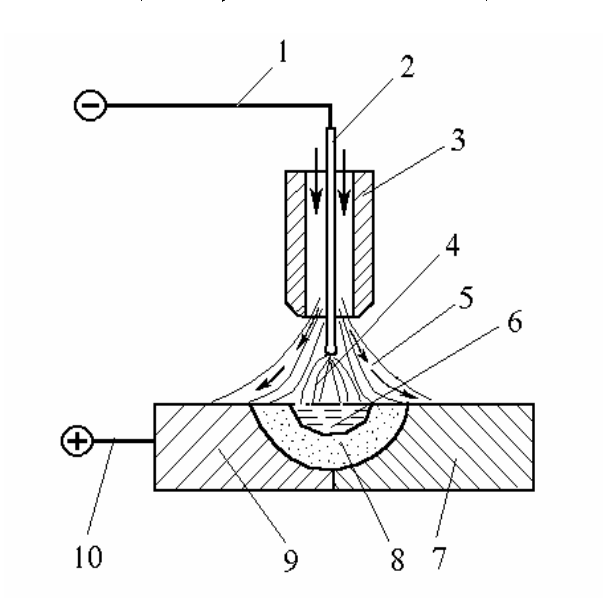


Рис. 15.5. Сварка в среде защитных газов

Контактная сварка относится к термомеханическому классу. Контактной называют сварку давлением, в процессе которой возникает тепло, выделяемое при прохождении электрического тока через площадки контактов свариваемых деталей. Рассмотрим схему контактной сварки (рис. 15.6). Пусть необходимо соединить лист 2 с профилем швеллерного типа 4 с помощью контактной сварки. В местах сварки детали подводятся к контактам 1 и 5, к которым подведен электрический ток проводами 6 и 8. Контакты с большим усилием P сжимают свариваемые детали, к ним подается импульс большого тока. Ток нагревает металл. При этом в месте прохождения сварочного тока металл расплавляется и получается сварочная точка 7. При контактной сварке со-

единяемые детали передвигают и снова подают ток. Так образуется ряд сварочных точек 3. Такая сварка обычно носит название точечной. Если вместо стержней-зажимов установить токопроводящие ролики-электроды, то получится шов от следа вращения ролика. При этом ток будет подаваться импульсами через очень короткие промежутки времени. Такой вид сварки принято называть роликовым.

Контактная сварка получила распространение в приборостроении прежде всего вследствие высокой скорости выполнения соединений – более 5 мм в одну минуту. Кроме того, точечная или шовная сварка может быть автоматизирована. Точечную сварку в некоторых случаях применяют в комбинации со склеиванием. В этом случае получается клеесварное соединение.

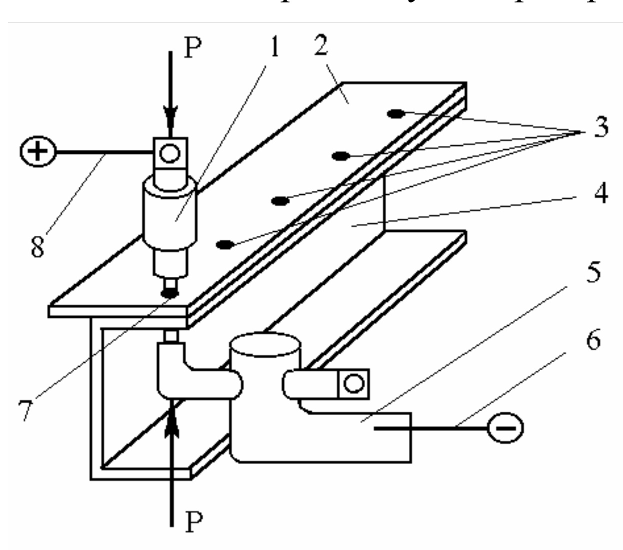
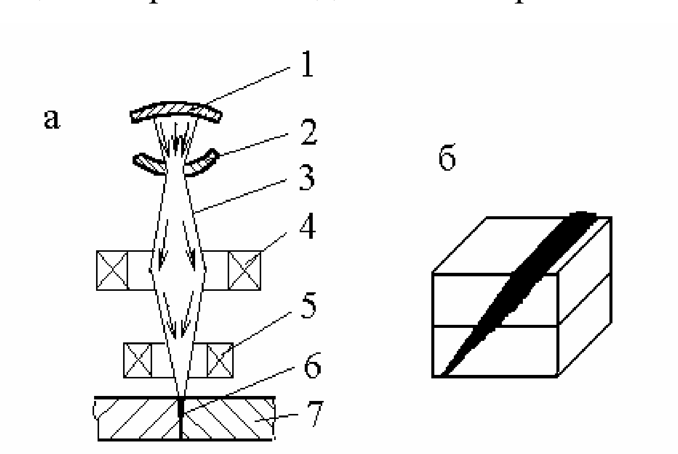


Рис. 15.6. Контактная сварка

Электронно-лучевую сварку относят к термическому классу. Она имеет довольно широкое распространение. Сущность электронно-лучевой сварки состоит в применении кинетической энергии электронов, с огромной скоростью движущихся в вакууме. Пучок электронов образуется за счет эмиссии электронов, испускаемых катодом. Устройство для электронно-лучевой сварки называют электронной пушкой. Рассмотрим принципиальную схему устройства для формирования электронного пучка, используемого для сварки металлов (рис. 15.7,а). Здесь катод 1, нагреваемый до 1200–1600°С, излучает электроны, ускоряемые вторым электродом (анодом) 2. Образуется электронный пучок 3. Катод 1 имеет форму пластинки (иногда форму спирали). Его изготавливают из вольфрама, тантала, гексаборида тантала. Оба электрода имеют размеры, позволяющие получить минимальный диаметр электронного пучка. При дальнейшем движении проявляется действие одноименных зарядов электронов, которые отталкиваются друг от друга и пучок расширяется. Для его сужения, увеличения концентрации энергии на единице площади, на пути электронного пучка устанавливают

магнитную линзу 4, сжимающую пучок. Далее устанавливают магнитную систему отклонения пучка. Для перемещения относительно сварного шва на пути электронного луча (пучка электронов) 3 помещают магнитную отклоняющую систему 5. Фокусируемый электронный луч падает на свариваемые детали 7. Здесь кинетическая энергии преобразуется в тепловую, нагревая металл до температуры плавления, что позволяет образовать сварной шов 6. Катод и анод помещают в вакуумную камеру для обеспечения перемещения электронов и тепловой изоляции электродов. Электронный пучок, используемый для сварки, имеет высокую плотность энергии в пятне нагрева, что позволяет сваривать очень многие металлы и сплавы. Швы, выполненные электронно-лучевой сваркой, имеют глубокое проплавление, которое часто называют кинжальным (рис. 15.7,б). Получение узкой и глубокой зоны плавления при ее малом объеме позволяет снизить расход энергии и деформацию свариваемых деталей по сравнению с дуговой сваркой.



Для эффективной защиты сварочной ванны от внешней среды сварку электронным лучом производят в вакууме. Такая сварка выполнялась в космическом пространстве космонавтами.

Рис. 15.7. Схема электронно-лучевой сварки

Лазерная сварка все более широко распространяется в приборостроении. Она основана на применении оптических квантовых генераторов (ОКГ). В этом случае используется тепло, возникающее на поверхности свариваемых материалов при воздействии на них светового луча ОКГ- лазера. Лазерное излучение использует высокую концентрацию энергии, превосходящую другие сварочные источники энергии (газовые, электронно-лучевые, дуговые). Лазерная сварка может выполняться в атмосфере воздуха или в среде защитных газов (аргона, гелия или углекислого газа).

Существенной особенностью лазерного излучения является то, что с помощью зеркальных оптических систем лазерный луч может быть

направлен в труднодоступные места и подан на значительное расстояние без потери энергии. Для сварки применяют твердотельные и газовые ОКГ.

Световой поток лазера (ОКГ) представляет собой электромагнитное излучение высокой интенсивности, имеет высокую направленность и позволяет концентрировать энергию в ничтожно малом объеме. Поскольку лазерное излучение, как и световой поток, может быть сфокусировано, то при высокой плотности излучения в зоне обработки получается локальность воздействия, малая зона термического влияния при кратковременном воздействии излучения. При этом обеспечивается бесконтактный ввод энергии в зону обработки. Отсюда минимальные изменения в околошовной зоне, что обеспечивает более высокую надежность сварного соединения, полученного с применением лазерного излучения.

Важнейшим преимуществом лазерной сварки является возможность использования луча из одного источника для сварки на нескольких рабочих местах (рис. 15.8). С помощью отклоняющего поворотно-

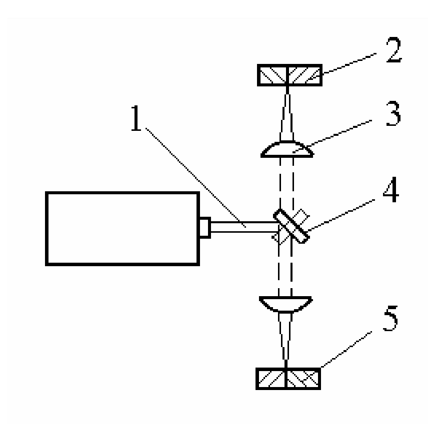


Рис. 15.8. Схема лазерной сварки

Рис. 15.9. Схема лазерной наплавки

го зеркала 4 через фокусирующее устройство 3 можно направлять лазерный луч 1 к рабочему месту 2 или 5. Очевидно, что в момент подготовки к сварке на одном рабочем месте, на другом будет происходить сварка. Отсюда ясно, что коэффициент использования оборудования будет выше, чем при других способах сварки. К преимуществам лазерной сварки следует отнести то, что она не нарушает условий охраны окружающей среды.

Еще одно важное преимущество лазерной сварки способствовало широкому ее распространению. Речь здесь идет о возможности наплавки различных металлов на поверхности деталей [9]. Такая наплавка по-

лучается при расплавлении металлического порошка (рис. 15.9). Здесь луч лазера 1 проходит через фокусирующее устройство 2 и затем уже попадает на деталь 4. В зону сварки через патрубок 3 подают металлический порошок. Металлический порошок, образуя небольшое облако 5, под действием луча расплавляется, покрывая деталь.

Для защиты сварочной ванны от воздействия внешней среды используют лазерную сварку с применением защитного газа (рис. 15.10). Здесь луч лазера 1 попадает на деталь. При этом он проходит через отверстие в трубе 2, по которой подают защитный газ. Он сдувает брызги и продукты испарений, которые получаются при сварке. Кроме того, сварка закрывается облаком нейтрального газа, изолируя сварочную зону от воздействия внешней среды.

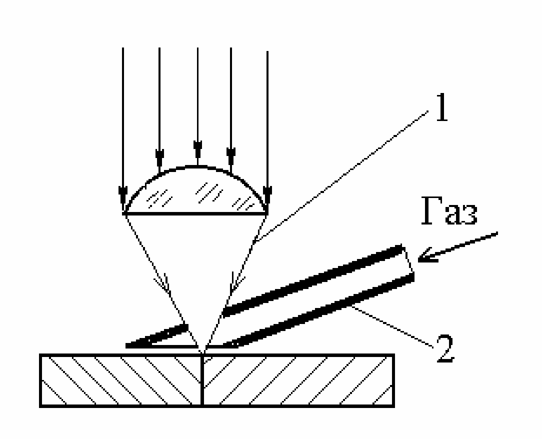


Рис. 15.10. Лазерная сварка с применением защитного газа

Плазменная сварка получила свое название по принципу использования ионизированного газа-плазмы. Плазму обнаруживают при различного вида разрядах, в том числе при получении электрической дуги. Во всех дугах обнаружены мощные потоки ионизированного газа, направленного преимущественно вдоль оси. Если столб дугового разряда сжать, то плотность тока в этом столбе возрастет и значительно увеличит рост температуры. Это положение использовано при создании устройств для плазменной сварки. Здесь плазмообразующий газ пропускают через очень узкое отверстие, где постоянно горит электрическая дуга. В этом месте происходит сжатие дуги. В качестве примера рассмотрим схему широко применяемого устройства (рис. 15.11) – плазмотрона 1 для микроплазменной сварки, т.е. сварки тонкостенных деталей. Здесь первоначально возникает дуга (дежурная) между вольфрамовым электродом 2 и металлическим корпусом 4 (соплом) плазмотрона. При этом электрод подключен к отрицательному полюсу, а сопло – к положительному. Для охлаждения сопла применяют воду. Теперь по стрелке 3 вдувают плазмообразующий газ, в качестве которого используют гелий, азот, аргон, водород или их смесь. В наконечнике плазмотрона проис-

ходит сжатие струи, что дает возможность сконцентрировать энергию в малом пространстве. При поднесении плазмотрона к свариваемому изделию 8 на расстояние 1–2 мм возбуждается рабочая дуга 7, которая и производит расплавление свариваемых кромок. Для защиты сварочной ванны от воздействия окружающей среды в пространство между соплом 4 и керамическим мундштуком 6 подают по стрелке 5 защитный нейтральный газ, например аргон.

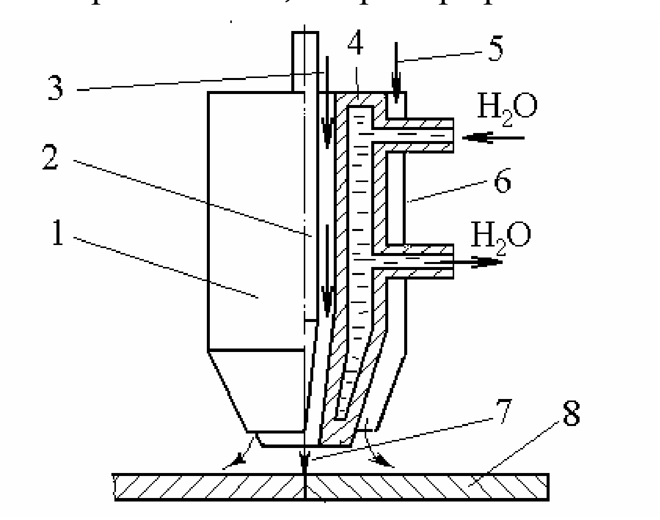


Рис. 15.11. Устройство плазмотрона

С помощью плазменной сварки можно получить неразъемные соединения из металлических (например, сталей, сплавов титана, молибдена и др.) и неметаллических материалов (например, различных диэлектриков, керамики) в разнообразных сочетаниях.

15.3. Специальные виды сварки

Диффузионную сварку осуществляют в вакууме при индукционном нагреве и небольшом сдавливании. Соединяемые детали 1 (рис. 15.12), помещенные в сварочную камеру 4 с разрежением порядка 10^{-2}–10^{-5} мм рт. ст., нагревают молибденовым нагревателем 2 и сдавливают давлением 5–20 Н/мм ^{2}, создаваемым штоком 3. Этот вид сварки относится к термомеханическому классу. Неразъемное соединение образуется за счет химического взаимодействия молекул и развития диффузионных процессов, т.е. взаимного проникнове-

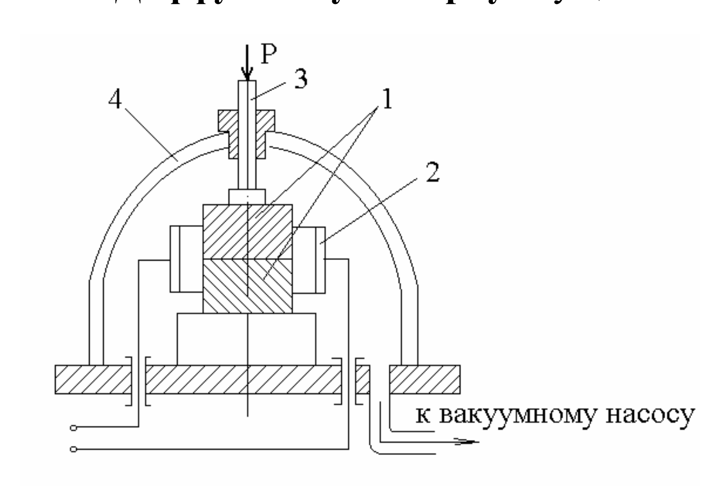


Рис. 15.12. Диффузионная сварка в вакууме

ния атомов и образования твердых растворов. В приборостроении диффузионная сварка может применяться для изготовления силовых узлов. К основным преимуществам диффузионной сварки относят исключение влияния на свойства основного металла, отсутствие механической и термической обработок, возможность полной автоматизации процесса. Диффузионная сварка позволяет осуществлять сварку таких материалов, как бериллий, титан, ковар, тантал, хромоникелевые стали и сплавы, корундовая керамика, оптические кристаллы типа лейкосапфира, кварца, селлаита (MgF_2). При этом реализуются соединения таких конфигураций, как тонкостенные оболочки, тонкие (до 0,01 мм) пластины, телескопические конструкции и т.д. с гарантией прочности и герметичности соединения. Деформация сварных узлов при данном способе сварки не превышает единиц и долей микрометра.

Ультразвуковая сварка относится к механическому классу сварки. Ее сущность состоит в том, что неразъемное соединение образуется при совместном воздействии на детали упругих колебаний ультразвуковой частоты и давления. При этом нагрев контактирующих поверхностей до температуры размягчения происходит благодаря превращению энергии колебаний звуковой частоты в тепловую. В авиастроении чаще всего применяют ультразвуковую сварку для соединения тонких пленок из полиэтилена, полистирола или других пластмасс. С помощью ультразвука сваривают детали из оргстекла. При этом исчезает почти полностью граница раздела между соединяемыми деталями.

Сварка взрывом относится к механическому классу. Здесь неразъемное соединение образуется за счет большого давления, возникающего при взрыве. В результате в зоне соединения металл нагревается, поскольку во время взрыва возникает пластическая деформация. Сварное соединение образуется в течение одной миллионной доли секунды. Таким способом можно соединить такие разнородные металлы, которые при сварке плавлением давали бы хрупкие соединения. При сварке взрывом можно получить сварные соединения практически неограниченной площади. Например, в промышленности осуществлены соединения площадью до 20 квадратных метров.

15.4. Резка металлов

Резку металлов осуществляют с применением высокотемпературного нагрева, поэтому употребляют выражение термическая резка. Термической резкой называют процесс отделения металлических частей (заготовок) от сортового или массивного проката в виде листов. Чаще

всего этот процесс образован на окислении или плавлении обрабатываемого металла.

Резка окислением состоит в нагреве металла до температуры горения, сгорания его в области и удалении продуктов сгорания струей кислорода. Однако не все металлы или сплавы поддаются резке окислением. Здесь необходимо соблюдение ряда условий. Прежде всего, температура воспламенения металла должна быть ниже температуры его плавления. Это очевидно, поскольку при горении после расплавления, металл вытечет из зоны реза, и он получится неровным, с наплывами. Например, не поддаются резке окислением алюминий и его сплавы. Температура воспламенения алюминия равна 900°С, а плавления – 660°С. Следовательно, алюминий может гореть только в жидком состоянии. Вот почему невозможно получить постоянную форму реза. Очень важно, чтобы температура плавления образующихся при резке окислов была ниже температуры плавления металлов. Тогда окислы становятся жидкотекучими и их легко удалить из области реза. Например окислы алюминия и хрома имеют температуру плавления 2050–2270°С. Поэтому резка окислением невозможна, так как окислы закрывают нагретое место.

Резка плавлением производится с помощью сильного концентрированного источника нагрева до температуры выше температуры плавления с последующим выдуванием расплава из места реза электрической дугой и газами, участвующими в процессе. Основными видами термической резки плавлением являются плазменно-дуговая, газолазерная, газодуговая. Здесь принцип расплавления тот же, что и при сварке с помощью электрической дуги или плазменной струи.

В приборостроении сварку применяют для изготовления деталей конструктивной базы (конструкционная сварка) и при электрическом монтаже приборов (монтажная сварка). Характерными видами сварочных работ при производстве деталей и узлов приборов являются: сварка каркасов, рамок, корпусов, крышек, экранов, волноводов; приварка лепестков и проводников заземлений к корпусам; герметизация корпусов приборов.

15.5. Пайка

Пайка – процесс соединения отдельных заготовок в единое целое в твердом состоянии расплавленными припоями, которые взаимодействуют с материалом заготовок, заполняют зазор между заготовками за счет капиллярных сил, смачивают паяемые поверхности или растекаются по ним и, кристаллизуясь при охлаждении, образуют паяный шов.

В отличие от сварки, пайку выполняют при температурах ниже температуры плавления материалов соединяемых заготовок. При пайке применяют припои, флюсы, защитные или активные технологические среды. В качестве припоев чаще используют цветные металлы и их сплавы, легкоплавкие неметаллические составы – стекло, припои, эмали, глазури. Металлические припои разделяют на высокотемпературные (медные, цинковые, серебряные, платиновые и др.), имеющие температуру плавления выше 673 К и применяемые, в основном, для пайки деталей несущих конструкций приборов и РЭА, воспринимающих значительную механическую нагрузку; низкотемпературные (оловянно-свинцовые, висмутовые, кадмиевые и др.) с температурой плавления ниже 673 К, невысокой механической прочностью и применяемые для электромонтажных целей. В зависимости от свойств паяемых материалов подбирают состав припоев из условий хорошей смачиваемости паяемого материала, близкого значения коэффициента термического расширения и более низкой температуры плавления припоя (на 50–100 К) по сравнению с паяемым материалом.

Флюсы удаляют окисные и адсорбированные пленки с паяемых поверхностей, защищают их от окислений и загрязнений в процессе пайки и тем самым способствуют лучшему смачиванию поверхностей припоем. По составу флюсы разделяют на четыре группы: на основе соединений бора, на основе фтористых соединений, на основе хлористых соединений, на основе канифоли и других органических соединений. Выбор флюса так же, как припоя, определяется свойствами паяемых материалов. Например, для пайки углеродистых сталей, меди и медных сплавов используют флюсы, содержащие соли борной кислоты и борного ангидрида. Но для нержавеющей стали эти флюсы не пригодны, так как они не растворяют окислы легирующих металлов (Ti, Cr, Ni и др.). Поэтому для пайки нержавеющих сталей берут флюсы с добавлением солей фтора, например, GaF_2, KF до 40%. При пайке в качестве защитных технологических сред применяют нейтральные газы, активные газы и вакуум.

Прочность, электропроводность и другие свойства паяного соединения определяется физико-химическими свойствами материалов заготовок и припоя и типом связей, возникающих между ними в процессе пайки. Не всегда структура и свойства сплавов, образующихся в паяных швах, определяется диаграммой состояния компонентов системы «материал заготовок – припой». Большое влияние оказывают режимы и условия пайки.

15.5.1. Режимы пайки

Понятие режима пайки включает в себя температуру пайки, скорость нагрева и его характер (ступенчатый или монотонный), время выдержки при температуре и скорость охлаждения паяемого соединения.

Рабочая температура пайки – это оптимальная температура, при которой образуется надежное паяное соединение. Обычно она выше температуры ликвидуса припоя, но в некоторых случаях может быть равна или даже ниже температуры ликвидуса.

Скорость нагрева при пайке охватывает широкий диапазон от долей градуса до нескольких десятков градусов в секунду и определяется материалами заготовок и припоя, габаритами и толщиной стенок заготовок и др., склонностью конструкции паяемого изделия или детали к образованию температурных напряжений при неравномерном прогреве и скоростью структурных превращений в паяемых материалах.

Ступенчатость или монотонность нагрева при пайке зависит, прежде всего, от свойств флюсов и скорости их испарения при нагреве. Так, при пайке в печах металлов высокотемпературными припоями заготовки нагревают до определенной температуры и только после этого вводят флюс и выполняют последующий нагрев до температуры пайки.

Выдержка при рабочей температуре пайки зависит от вида пайки и используемого способа нагрева. Время выдержки при пайке с использованием нагрева. Время выдержки при пайке с использованием нагрева от электронного луча – доли секунды, а при печной пайке – десятки минут.

Скорость охлаждения паяных заготовок оказывает большое влияние на формирование структуры шва, распределение компонентов припоя по толщине шва, механических напряжений в материалах шва и заготовок. Рис. 15.13 иллюстрирует зависимость содержания эвтектической составляющей от скорости охлаждения шва после пайки магния серебром. Выбором скорости охлаждения можно совместить процесс пайки с процессом термической обработки шва.

15.5.2. Условия пайки

Под условиями пайки подразумевают: зазор между заготовками, используемые средства удаления окислов с паяемых поверхностей, способ нагрева, вид технологической среды, окружающей зону пайки, использование или отсутствие при пайке ультразвуковых колебаний, электрических и магнитных полей и других физических явлений технологического назначения.

Зазор между паяемыми поверхностями заготовок устанавливают перед пайкой в зависимости от сочетания «припой – материал заготовок». Диапазон используемых зазоров находится в пределах от 0,05 до 0,8. Увеличение зазоров за оптимальные значения для конкретной пары «припой – материал заготовки» делает швы более хрупкими, а уменьшение – непропаянными.



Рис. 15.13 Зависимость эвтектической составляющей в структуре шва от скорости охлаждения шва

Для предварительного удаления окислов с паяемых поверхностей используют флюсы, газовые среды, нагрев в вакууме, ультразвуковые колебания и т. д.

Пайку выполняют при нагреве заготовок и припоя в электропечах с конвекторной теплопередачей и инфракрасным нагревом, в индукционных установках, в установках с расплавом припоя, в установках с концентрированным источником энергии, оснащенных кварцевыми лампами, газоплазменными горелками, электронно-лучевыми или лазерными лучами. Ряд процессов пайки осуществляют паяльниками различного типа. Выбор способа нагрева и нагревательного оборудования обуславливается паяемыми материалами, температурой пайки, особенностями паяемой конструкции.

Спаи металлов с керамикой и другими неметаллическими материалами получают следующими способами: пайкой припоями предварительно металлизированной керамики, аналогичной пайке металлов; активной пайкой в вакууме или в инертных газах неметаллизированной керамики при использовании титана и циркония, способствующих растеканию припоя по поверхности керамики; пайкой металлов с керамикой высоко- и низкотемпературными стеклоприпоями; пайкой в водороде металлов с керамикой, покрытой сырым (не подвергнутым спеканию) металлизационным слоем.

15.6. Технологические процессы изготовления деталей приборов и радиоэлектронной аппаратуры, получаемых сваркой и пайкой

Технологические процессы изготовления сварных и паяных деталей приборов и РЭА, как правило, включают в себя не только операции сварки, пайки и сопутствующие им операции вспомогательного назначения, но и ряд других операций, формирующих эксплуатационные свойства деталей и основанных на использовании иных методов обработки конструкционных материалов: термических, химических, размерной и безразмерной механической обработки, давлением, гальванических, вакуумных и процессов другой физической природы.

Укрупненно технологический процесс изготовления сварных и паяных деталей можно представить следующими последовательно выполненными этапами: изготовление и подготовка заготовок под сварку (или пайку), а также их сборка; выполнение операций сварки (или пайки) и операций, улучшающих сварные (или паяные) соединения с последующим контролем; выполнение комплекса операций, формирующих эксплуатационные свойства деталей другими методами с последующим контролем качества изготовления.

Конкретное содержание операций подготовки поверхности, выполнения сварки или пайки, улучшения качества сварных и паяных соединений зависит от многих факторов: вида сварки или пайки; материалов заготовок и припоя, присадочного материала, требований к соединению и др.

Подготовка поверхностей под сварку заключается в химическом, термическом или механическом удалении со свариваемых поверхностей окисных и других пленок, загрязнений и неровностей, образовавшихся при хранении и транспортировке исходного материала заготовок. При необходимости осуществляют подготовку кромок свариваемых заготовок.

Подготовка поверхностей под пайку более сложная и трудоемкая, чем под сварку. Кроме удаления загрязнений выполняют обезжиривание (химическое, электрохимическое, ультразвуковое), травление окислов на поверхности, промывку и сушку, нанесение металлических покрытий для облегчения пайки или вместо припоя, нанесение неметаллических покрытий для предотвращения нежелательного растекания припоя (например, нанесение глиноземной пудры или пасты из окислов Si, Ti, Ge, Pb и др.).

Сборка заготовок под сварку и пайку выполняется для создания заданных зазоров между соединяемыми заготовками и их взаимного

положения. Сборочные приспособления выполняют с учетом обеспечения свободного доступа к месту сварки или пайки. При значительных габаритах деталей, например рамы несущих конструкций приборов и РЭА, при сборке под сварку используют прихватку, т. е. короткие сварочные швы. Отличительными особенностями выполнения сборочных операций под пайку являются широкое использование для сборки конструктивных элементов самих заготовок, которые подвергаются пластическим деформациям при сборке (вальцевание, кернение, чеканка и др.), и использование дополнительных технологических элементов–штифтов, клиньев, заклепок, проволочек.

Сущность операции сварки, независимо от используемого источника теплоты, заключается в локальном расплавлении материала заготовок (с использованием давления или без него) по кромкам или поверхностям соединяемых заготовок до образования сварочной ванны небольшого объема, окруженной со всех сторон значительным объемом холодного металла, и последующего перемещения зоны нагрева вдоль кромок свариваемых заготовок. В зависимости от характера перемещения зоны нагрева после остывания расплавленного металла образуются непрерывные швы или точечные соединения.

Типичными элементами операции пайки являются: нанесение флюса на соединяемые поверхности, введение припоя в зазор между заготовками, нагрев заготовок и припоя до рабочей температуры пайки, выдержка при этой температуре, охлаждение спаянной детали, удаление детали из приспособления, удаление остатков флюса. В зависимости от вида пайки отдельные процессы могут отсутствовать, заменены на другие или выполняться одновременно.

15. 7. Контроль качества деталей, получаемых сваркой и пайкой

Контрольные операции, входящие в состав технологических процессов сварки и пайки, относят к одному из трех видов: операциям входного контроля заготовок и материалов, поступающих на специализированные рабочие места (визуально контролируются качество подготовки поверхности заготовок под сварку и пайку и марки материалов по сопровождающим документам); операциям текущего контроля качества сборки заготовок (контролируются зазоры и правильность взаимного расположения) и выполнения режимов сварки и пайки; операциям контроля геометрических размеров деталей и качества сварных и паяных швов после изготовления.

Качество сварных и паяных соединений заготовок оценивают в производственных условиях следующими методами.

Метод неразрушающего контроля применяют для обнаружения таких дефектов соединения, как непроваров, трещин, газовых пор, степени деформации привариваемого проводника (при микросварке) ультразвуком, разгерметизации, увеличения омического сопротивления монтажного паяного соединения и т. д.

Неразрушающие методы контроля различают по признаку физического явления, который положен в его основу. Методы контроля герметичности соединений основаны на обнаружении утечки сверхтекучих газов, например гелия. Широко используются радиационные (с использованием рентгеновских гамма-лучей), ультразвуковые, магнитографические методы, метод электросопротивления. При радиационном методе контроля соединения пучок рентгеновских или гамма-лучей направляют на контролируемый шов. Проходя через него, лучи в меньшей степени поглащаются в местах дефектов. Различие интенсивности прошедших через шов лучей фиксирует соответствующий индикатор (экран, фотопленка, ионизационный прибор). Зарегистрированная картина дефектов сравнивается с эталоном, и дается заключение о качестве соединений.

Ультразвуковые методы контроля соединения основаны на явлении отражения ультразвуковых колебаний от поверхности раздела двух сред (дефектного включения) под углом, равным углу падения. Отраженная энергия при прочих равных условиях будет характеризовать размер, ориентацию и форму дефекта.

Магнитографический метод контроля основан на обнаружении магнитных полей рассеяния, возникающих в местах дефектов соединений при намагничивании контролируемых деталей. Поля рассеяния от дефектов фиксируются в виде магнитных отпечатков на эластичном магнитоносителе (ленте, пленке) дефектоскопа, который плотно прижимается к шву при контроле.

Метод разрушающего контроля образцов, идентичных сварным и паяным деталям по конструкции соединения и режимам получения, но приспособленных для установки в контрольные устройства контролирует в основном прочностные характеристики, пределы прочности на разрыв, срез и кручение. Кроме предельных значений определяемых прочностных параметров контролируют качественные признаки, например качество соединения, полученного точечной сваркой. Считается удовлетворительным, если при разрушении образца отрывом произойдет вырыв сварной точки из основного материала заготовки с заданным диаметром литого ядра.

Разрушающие методы контроля соединений основаны на создании монотонно-изменяющихся напряжений, разрушения соединения этими напряжениями и фиксации их значений в момент разрушения. Этими методами можно установить соответствие соединений эксплуатационным требованиям или выявить влияние технологических и конструктивных факторов на изменение численных характеристик показателей качества.

Косвенный метод осуществляют через контроль качества подготовки заготовок под сварку или пайку, качества используемых материалов, а также соблюдения режимов получения соединений.

Конкретный перечень проверяемых параметров соединений целиком зависит от эксплуатационных требований к сварным и паяным деталям.

15.8. Заклепочные соединения

Соединение заклепками позволяет получить прочный, надежный и, если необходимо, герметичный шов при сборке деталей из различных однородных и неоднородных материалов. Заклепочные соединения (в отличие от сварных) ограничивают распространение трещин, образовавшихся на деталях. Выполнение заклепочных соединений не требует сложного технологического оборудования. В то же время клепка отличается трудоемкостью, причем, необходимы дополнительные детали в конструкции. Сверление отверстий под заклепку не только не увеличивает трудоемкость, но и снижает прочность материала. Заклепка увеличивает массу конструкции. Несмотря на эти недостатки соединения заклепками находят применение в приборостроении. Технологический процесс выполнения соединения заклепками состоит из подготовительного этапа и процесса установки заклепок.

Подготовительный этап включает такие работы, как подготовка поверхностей и сверление отверстий под заклепки. Поверхности, соединяемые заклепками должны плотно прилегать друг к другу. От этого зависит прочность, герметичность и точность шва. Подгонка достигается правкой (рихтовкой), опиловкой, механической обработкой на станках. Сверление отверстий под заклепки производится или по предварительной разметке, или по кондуктору. Перед сверлением детали соединяются и скрепляются струбцинами.

Выбор диаметра сверла зависит от требований точности соединения и производительности сборки. Параметры заклепочных соединений приведены на рис. 15.14.

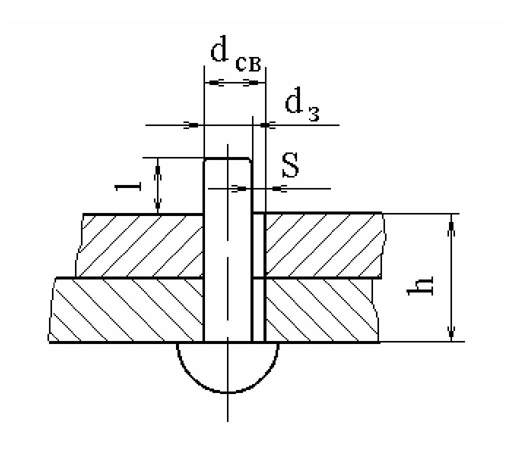


Рис. 15.14. Параметры цельной заклепки и установочного зазора

$$d_{св} = d_{з} + S,$$

где $d_{св}$ – диаметр сверла, мм; $d_{з}$ – диметр заклепки, мм; S – посадочный зазор, мм.

Для точных соединений зазор равен

$$S = (0{,}05...0{,}1)d_{з}.$$

Диаметр заклепок при $h < 10$ мм можно определить по формуле $d_{з} = 1 + 0{,}5h$, где h – суммарная толщина соединения, мм. Длина выступающей части заклепки $l = (1.0...1{,}5)\ d_{з}$. Увеличение выступающей части заклепки может привести к ее продольному изгибу, а уменьшение – к нехватке материала для образования замыкающей головки. Если закладные и замыкающие головки делаются потайными или полупотайными, то после сверления производится зенкование отверстия коническими зенковками.

Установка заклепок. По технологическим признакам, определяющим метод образования замыкающей головки, конструкции заклепок можно подразделить на цельные, пустотелые и трубчатые. При выборе материала заготовок ориентируются на материал соединяемых деталей: для металлических деталей материал заклепок желательно брать аналогичным материалу деталей; для пластмасс и других неметаллических материалов можно рекомендовать заклепки из алюминиевых сплавов или стальные трубчатые заклепки. Наиболее распространенные материалы заклепок: сталь 10,15; медь М1, М2; латунь Л62, алюминий А1,А2; алюминиевый сплав АД1 и др. Установка заклепок обычно выполняется так, что закладная головка находится внутри соединяемых деталей или снизу. Если шов длинный и соответственно имеет большое количество заклепок, рекомендуется сначала установить фиксирующие заклепки, расположенные в разных местах шва, во избежание смещения отверстий вследствие вытягивания материала при последовательной установке заклепок. Вместо фиксирующих заклепок можно применять временные болты. Заклепочное соединение образуется в результате формирования замыкающей головки и компенсации посадочного зазора вследствие осадки заклепки. Замыкающая головка формируется специальными инструментами-обжимками с помощью ударной нагрузки, прессования или развальцовки. Ударная нагрузка создается пневматическим или ручным молотком.

Установка заклепок прессованием осуществляется или на стационарных прессах различной мощности, позволяющих устанавливать сразу несколько заклепок с хорошим качеством шва, или с помощью ручных рычажных приспособлений, применяемых главным образом для установки трубчатых заклепок.

Образование замыкающих головок развальцовкой выполняется обычно на сверлильных станках. Обжимка получает вращение с достаточно высокой частотой (свыше 1500 об/мин) и осевую нагрузку. Деформирование заклепки при этом происходит плавно, что позволяет применять соединения заклепками при сборке деталей, имеющих повышенную хрупкость материала. Наиболее распространенные варианты клепаных соединений изображены на рис. 15.15.

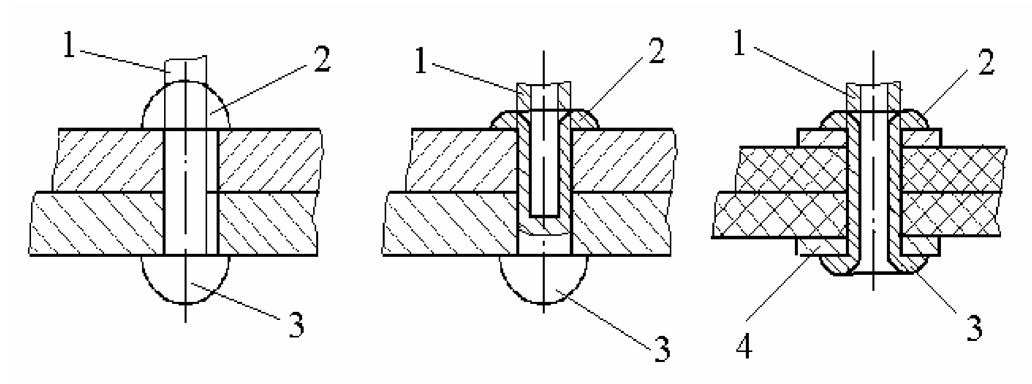


Рис. 15.15 Варианты установки заклепок:
а – цельной; б – пустотелой; в – трубчатой; 1 – исходная форма заклепки; 2 – замыкающая головка; 3 – закладная головка; 4 – металлическая шайба

При контроле соединений заклепками обращается внимание на качество замыкающей головки, плотность прилегания и неподвижность заклепок; герметичность шва проверяется на специальных установках.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой процесс сварки?
2. Что называется сваркой плавлением, сваркой давлением?
3. Что собой представляет сварочная дуга?
4. Что такое пайка?
5. Какие процессы лежат в основе получения заклепочных соединений?
6. В чем заключается подготовка поверхностей под сварку и пайку?
7. Сущность лазерной, электронно-лучевой, ультразвуковой сварки.
8. Преимущество диффузионной сварки.

Глава XVI. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

16.1. Общие положения

Первое упоминание о методах, которые впоследствии назовут нанотехнологией, сделал Ричард Фейнман в 1959 году [2]. Он предположил, что возможно перемещать атомы отдельно, механически, при помощи манипулятора соответствующих размеров.

Этот манипулятор он предложил делать следующим способом. Необходимо построить механизм, создававший бы свою копию, только на порядок меньшую. Созданный меньший механизм должен опять создать свою копию, опять на порядок меньшую и так до тех пор, пока размеры механизма не будут соизмеримы с размерами порядка одного атома. При этом необходимо будет делать изменения в устройстве этого механизма, так как силы гравитации, действующие в макромире, будут оказывать все меньшее влияние, а силы межмолекулярных взаимодействий и силы Ван-дер-Ваальса будут все больше влиять на работу механизма. Последний этап – полученный механизм соберёт свою копию из отдельных атомов. Принципиально число таких копий неограниченно, можно будет за короткое время создать любое число таких машин. Эти машины смогут таким же способом, поатомной сборкой собирать макро-изделия. Это позволит сделать изделия на порядок дешевле – таким роботам (нанороботам) нужно будет дать только необходимое количество молекул и энергию, и написать программу для сборки необходимых предметов. До сих пор никто не смог опровергнуть эту возможность, но и никому пока не удалось создать такие механизмы.

Приставка нано (от греч. "nannos" – "карлик") означает одну миллиардную (10^{-9}) долю какой-либо единицы. Атомы и мельчайшие молекулы имеют размер порядка 1 нанометра.

Современные микросхемы, с размерами компонентов в одну десятую толщины тончайшего волоса могут считаться маленькими в стандартах тесальщиков кремня, но каждый транзистор все еще содержит триллионы атомов, и микрочипы все еще видимы невооружённым глазом.

Древние приемы технологии, которые можно проследить от ручной обработки камня до кремниевых чипов, таковы, что обращаются с сырьем, представляющее собой большие совокупности атомов и молекул.

Нанотехнология призвана прецизионно (сверхточно) манипулировать индивидуальными атомами и молекулами.

Нанотехнология – это совокупность методов производства продуктов с заданной атомарной структурой путем манипулирования атомами и молекулами.

В связи с данным определением нанотехнологии, возникает естественный вопрос: каким же образом мы можем манипулировать веществом на уровне атомов и молекул? Ведь наши руки слишком громадны для наномасштаба. Этот вопрос является камнем преткновения современной нанонауки.

Впервые термин «нанотехнология» употребил Норио Танигути в 1974 году. Он назвал этим термином производство изделий размеров порядка нанометров. В 1980-х годах этот термин использовал Эрик К. Дрекслер в своей книге «Машины создания: грядёт эра нанотехнологии» («Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology»), которая вышла в 1986 году. Этим термином он называл новую область науки, которую он исследовал в своей докторской диссертации в Массачусетском Технологическом Институте (МТИ). Результаты своих исследований он впоследствии опубликовал в книге «Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation». Главную роль в его исследованиях играли математические расчёты, поскольку с их помощью до сих пор можно проанализировать предположительные свойства и разработать устройства размеров порядка нанометров.

Для манипулирования атомами Дрекслер изобрел специальные наномашины или ассемблеры. Чтобы их представить, нужно сначала наглядно представить, как выглядит молекула. Для этого мы изобразим атомы как бусинки, а молекулы – как группы бусинок, соединённые между собой кусочками проволоки. Атомы имеют круглую форму подобно шарам, и хотя молекулярные связи не кусочки проволоки, такая визуальная модель, как минимум, даёт важное представление о том, что связи могут быть порваны и восстановлены (рис. 16.1).

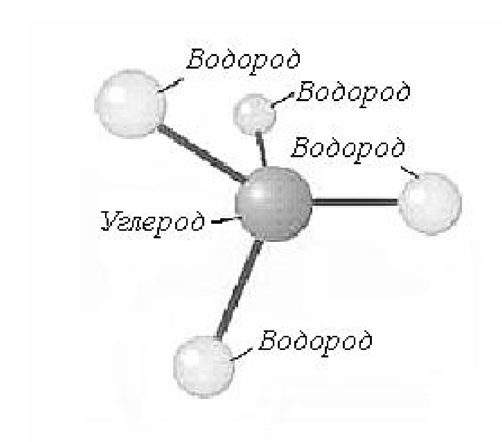


Рис. 16.1. Модель молекулы метана (CH_4)

Наномашины должны уметь захватывать атомы или молекулы и соединять их между собой, причем не хаотично, а в соответствии с заданным алгоритмом. Важно отметить, что такие машины уже тысячи лет превосходно функционируют в природе, и примером их работы может служить механизм синтеза белка рибосомами.

16.2. Процесс создания белка

Белки – обязательная составная часть всех клеток, обеспечивающая их жизнедеятельность. Роль белков в организме чрезвычайно разнообразна. Различают белки-гормоны, участвующие в управлении всеми жизненными процессами организма, его ростом и размножением. На сетчатке нашего глаза возникает изображение благодаря особому светочувствительному белку – родопсину. Мы способны двигаться, потому что наши мышцы сокращаются и расслабляются благодаря белкам актину и миозину. Все химические процессы в организме протекают при участии специальных белков-ферментов. Без них невозможны пищеварение, дыхание, обмен веществ, свертывание крови и пр. Белки выполняют и защитные функции – при попадании в организм болезнетворных бактерий или ядов вырабатываются белки-иммуноглобулины, нейтрализующие их вредное воздействие.

При знакомстве с таким разнообразием белков и их функций, весьма неожиданным оказывается тот факт, что все белки растительного и животного мира – от совершенно инертных до биологически активных состоят из одних и тех же стандартных звеньев – аминокислот, соединенных прочной химической связью, называемой пептидной. Внешне молекула белка подобна последовательности бусинок на нити, где роль бусинок выполняют молекулы аминокислот. В составе большинства белков находится в среднем 300–500 таких "бусинок".

На рисунке 16.2 показана структура молекулы белка.

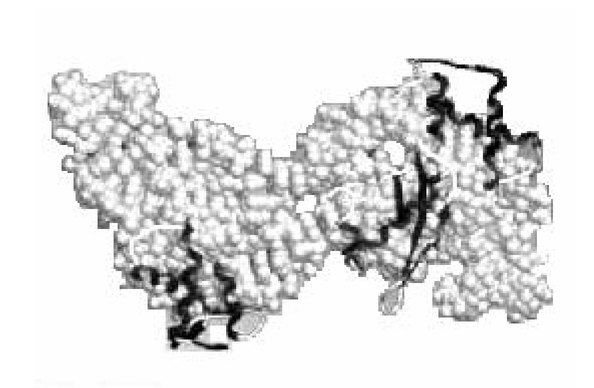


Рис. 16.2. Структура молекулы белка

Количество существующих в природе аминокислот ограничено – всего 20 видов, потому их можно уподобить 20 "буквам" особого "химического алфавита", из которых составлены белки – "слова" длиной в 300–500 букв.

С помощью 20 букв можно написать огромное количество таких длинных слов. Если учесть, что замена или перестановка хотя бы одной буквы в слове придаст ему новый смысл, то число возможных комбинаций букв в слове длиной в 500 символов составит 20500.

Цепь каждого белка построена из свойственной только этому белку комбинации аминокислот – только определенное число и только в определенной последовательности. Уникальность характерной для того или иного белка комбинации аминокислот и определяет его химические и биологические свойства. Перестановка всего лишь одного аминокислотного звена на другое место, его замена или потеря приведет к очень значительному изменению свойств белковой молекулы. Значит, при синтезе (построении) отдельного белка необходимо владеть точной информацией о чередовании аминокислотных звеньев в его структуре. В природе такая информация хранится на специальном носителе – молекуле ДНК, в которой содержится информация о структуре всех существующих в организме белков.

Отрезок молекулы ДНК, в котором содержится информация о последовательности аминокислот в одном белке, называется геном, потому информацию в ДНК, называют генетической, а ген является единицей наследственного материала. В ДНК содержится до нескольких сот генов.

Молекула ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты) представляет собой две спирально закрученные одна вокруг другой нити. Ширина такой двойной спирали около 2 нм. Длина же – в десятки тысяч раз больше – несколько сотен тысяч нанометров (рис. 16.3). За открытие двойной спирали ДНК, несущей наследственную информацию, в 1962 году ученые Уотсон и Крик получили Нобелевскую премию.



16.3. Структура молекулы ДНК

Нити ДНК представляют собой цепи из нуклеотидов. Нуклеотиды – это органические вещества, состоящие из трех соединенных друг с другом молекул: азотистого основания, пятиуглеродного сахара (пентозы) и остатка фосфорной кислоты. Нуклеотиды назвали по именам 4-х типов азотистых оснований, входящих в их состав – аденин (А), гуанин (Г), цитозин (Ц) и тимин (Т). Порядок расположения четырех типов нуклеотидов в цепях ДНК очень важен – он определяет порядок аминокислот в белках, то есть их структуру.

Чтобы понять, как в ДНК запрограммирована структура белка, стоит вспомнить азбуку Морзе, по которой все буквы алфавита, знаки препинания и цифры обозначаются комбинацией коротких (точка) и длинных (тире) сигналов. Оказывается, подобный шифр существует и в ДНК. Как в азбуке Морзе каждой букве соответствует определенное сочетание точек и тире, так в коде ДНК определенное последовательное сочетание нуклеотидов соответствует определенной аминокислоте в молекуле белка. Знать код ДНК – значит знать, сочетание нуклеотидов соответствующее каждой аминокислоте.

Чтобы закодировать все возможные цифры, буквы и знаки препинания нам хватает всего двух символов (точка и тире). Чтобы закодировать одну аминокислоту, сочетания из трех нуклеотидов вполне достаточно. (Из 4 нуклеотидов можно создать 64 комбинации, по три нуклеотида в каждой: $4^3 = 64$). Такое сочетание называется триплетом или кодоном.

Код ДНК обладает однозначностью (один триплет шифрует не более одной аминокислоты) и универсальностью (т.е. для всего живущего и растущего на Земле – бактерий, грибов, злаков, муравья, лягушки, лошади, человека – одни и те же триплеты кодируют одни и те же аминокислоты). В настоящее время код ДНК расшифрован полностью, т.е. для каждой аминокислоты точно установлены кодирующие ее триплеты.

Важно, что замена или удаление хотя бы одного нуклеотида в последовательности ДНК, приведет к нарушению структуры синтезируемых белков. Являясь матрицей для синтеза всех белков, сама молекула ДНК, однако, в процессе синтеза не участвует. Она является лишь носителем генетической информации. При синтезе белка, информация о его структуре сначала доставляется из ДНК к молекуле рибосомы – своеобразной фабрике по производству белков. Этот перенос информации осуществляется с помощью молекулы информационной РНК (рибонуклеиновая кислота), которая является точной копией – зеркальным отражением структуры одного участка ДНК. И-РНК – это одноцепочная

спираль, комплементарная одной нити молекулы ДНК. Процесс копирования генетической информации из ДНК в РНК называют транскрипцией (лат. "transcriptio" - переписывание). В процессе переписывания специальный фермент – полимераза, двигаясь вдоль ДНК последовательно считывает ее нуклеотиды и по принципу комплементарности образует цепочку и-РНК, как бы снимая с ДНК "чертеж" того или иного гена. С каждого гена можно снять любое число копий РНК.

Таким образом, можно сказать, что в процессе синтеза белка и-РНК выполняет роль перфокарты, на которую записана "программа" для построения конкретного белка. Итак, молекула и-РНК с записанной на нее программой направляется к рибосоме, где происходит синтез белка. Туда же направляется поток материала, из которого строится белок - аминокислот. Аминокислоты попадают в рибосому не самостоятельно, а с помощью подвижных транспортных РНК (т-РНК). Эти молекулы способны различать среди всего многообразия аминокислот только "свою" аминокислоту, присоединять её к себе и подтаскивать к рибосоме. Синтез белка на рибосомах называется трансляцией (от лат. "translatio" – "передача"). По мере сборки белковой молекулы рибосома "ползет" по и-РНК и синтезирует белок, запрограммированный на данной и-РНК. Чем дальше продвинулась рибосома по и-РНК, тем больший отрезок белковой молекулы "собран". На ленте и-РНК, как на конвейере, одновременно идет сборка одного и того же белка несколькими рибосомами (рис. 16.4). Когда рибосома достигает конца и-РНК, синтез окончен.

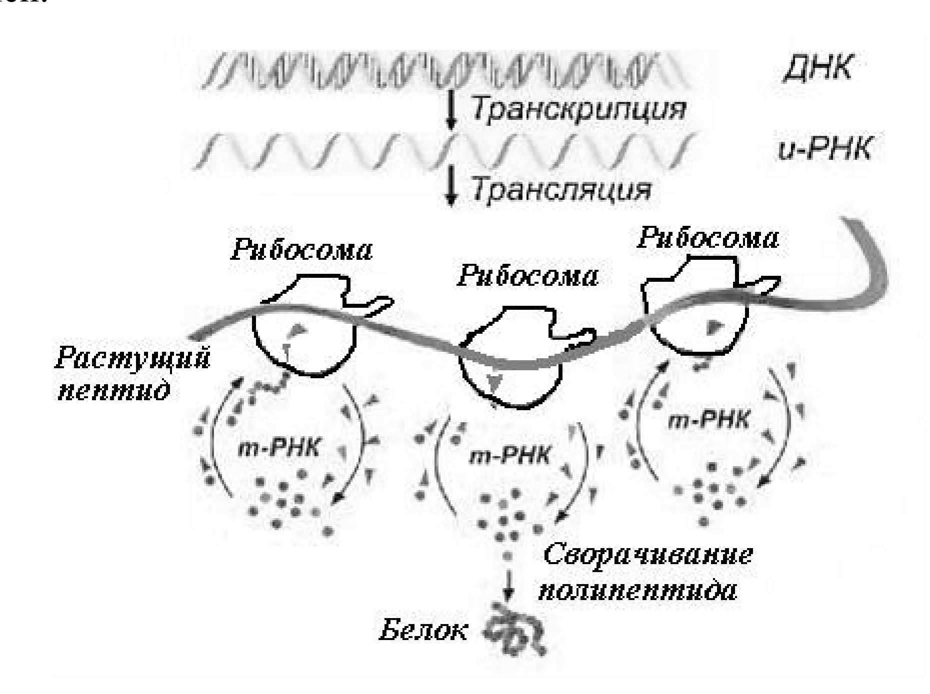


Рис. 16.4. Процесс синтеза белка рибосомами

Теперь остановимся подробнее на механизме работы рибосомы. Обратимся к рисунку. Рибосома движется по и-РНК не плавно, а прерывисто, "шажками", триплет за триплетом. На каждом шаге к месту контакта рибосомы с и-РНК "подплывает" какая-нибудь молекула т-РНК с прицепленной к ней аминокислотой.

Как уже было сказано, каждая т-РНК способна различать только "свою" аминокислоту и присоединять её для транспортировки к месту построения белка. Это происходит благодаря содержащемуся в ней триплету, комплементарному (подходящему) конкретной аминокислоте.

Если кодовый триплет т-РНК окажется комплементарным к триплету и-РНК, находящемуся в данный момент в рибосоме, то аминокислота, отделится от т-РНК и присоединится к строящейся цепочке белка (к белковой молекуле добавится еще одна "бусинка") (рис. 16.5).

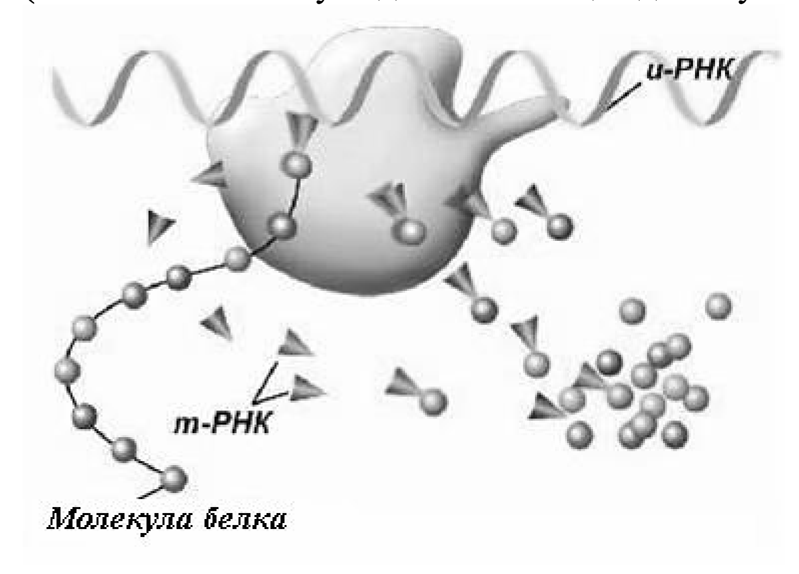


Рис. 16.5. Рибосома синтезирует белок

Свободная т-РНК затем выбрасывается из рибосомы в окружающую среду. Здесь она захватывает новую молекулу аминокислоты и несет ее в любую из работающих рибосом. А наша рибосома делает следующий "шаг" вперед по и-РНК на один триплет, Так постепенно, триплет за триплетом, движется по и-РНК рибосома и растет звено за звеном цепь белка.

Пройдя по всей длине и-РНК, рибосома с готовым белком "сходит" с неё. Затем белковая молекула направляется к тому участок клетки, где требуется данный вид белка, а рибосома направляется к любой другой и-РНК (рибосома способна синтезировать любой белок; характер белка зависит исключительно от матрицы и-РНК).

Итак, рибосомы доказали, что наномашины, построенные из белка и РНК, могут быть запрограммированы на построение сложных моле-

кул, то есть по сути являются природными ассемблерами (сборщиками атомов) для производства заданных молекулярных структур.

Генные инженеры сегодня пытаются построить первые экспериментальные искусственные наномашины, используя биологический природный материал: аминокислоты, белки, молекулы ДНК и др. Однако биоподобные наномашины (и все, что они могут создать) – это органика, а значит, их возможности ограничены. Они теряют стабильность или разрушаются при повышенных температурах и давлениях (происходит сворачивание белка), подвержены радиации, не могут обрабатывать твердый материал, действовать в химически агрессивных средах и т.п. Поэтому было бы неразумно отказаться от грандиозных наработок человечества в сфере балк-технологии. Это все то, до чего "не додумалась" природа, от колеса до компьютера.

В то же время без биоподобных структур очень трудно манипулировать отдельными атомами и молекулами. Поэтому наномашины-ассемблеры должны представлять собой синтез живых и технических систем. Дрекслер дает ассемблеру следующее определение:

Ассемблер – это молекулярная машина, способная к саморепликации, которая может быть запрограммирована строить практически любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков. Главная задача ассемблера – соединение атомов и молекул в заданном порядке. Он должен уметь строить наносистемы любого назначения – двигатели, станки, вычислительные устройства, средства связи и т.д. Это будет универсальный молекулярный робот со сменными программами на "перфолентах" типа цепочек РНК или ДНК. Внешний вид сборщика можно представить себе как "ящик" нанометрового размера с "рукой" - манипулятором длиной в сотню атомов. Исходным материалом для манипулятора могут служить атомы, молекулы, и химически активные молекулярные конструкции. Внутри сборщика размещены устройства, управляющие работой манипулятора и содержащие программу всех его действий. Поскольку составление больших молекул со сложной структурой потребует особой точности в позиционировании, ассемблер должен иметь несколько таких манипуляторов. Возможно, что ассемблер будет чем-то похож на паука, при этом одними "лапами" он будет держаться за поверхность, а другими складывать сложные молекулярные структуры атом за атомом.

Наиболее популярная схема наноассемблера представлена на рисунке 16.6. Управлять сборщиками должны будут нанокомпьютеры, программируемые на каком-нибудь обычном языке управления промышленными роботами, и имеющие связь с обычным компьютером, управляемым человеком.

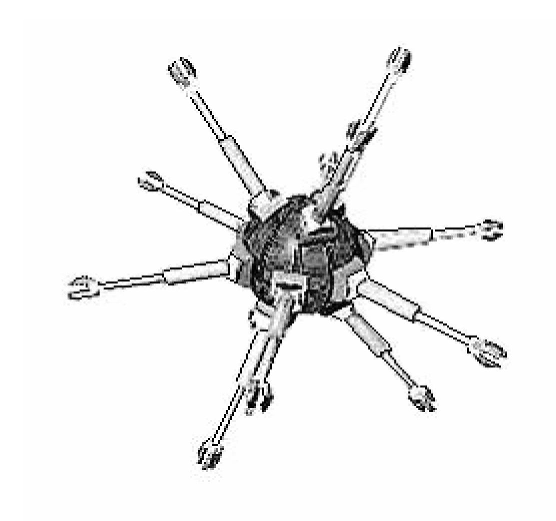


Рис. 16.6. Внешний вид наноассемблера

Представим, что человек – оператор моделирует на компьютере некоторую конструкцию, особым образом задавая её молекулярную структуру. "Нарисовав" нужный объект, человек передает команду ассемблерам, которые, начинают создавать его атом за атомом. И через некоторое время у конструктора появляется готовая вещь с заданными характеристиками при минимальном вмешательстве человека.

Ассемблеры могут работать в паре с дизассемблерами – наномашинами, способными разбирать объект на атомы с записью его структуры на молекулярном уровне. Например, для того, чтобы создать копию какого-то объекта, необходимо, чтобы дизассемблер разобрал его атом за атомом, и передал всю информацию о типе атомов, их положении и т.д. ассемблеру, который потом может создавать копии объекта сколько угодно раз. Теоретически такая копия ничем не будет уступать оригиналу – она будет повторять его вплоть до отдельного атома! Дизассемблеры также помогут ученым лучше узнать вещи и их атомную структуру.

Как уже было сказано, ассемблеры будут обладать способностью к репликации (размножению). Когда речь идет об эволюции, то репликатор – это объект, который способен сам себя скопировать, включая любые изменения, которым он мог подвергнуться (подобно гену, миму или компьютерному вирусу). Реплицируется (размножается путём создания своей копии) ассемблер по команде от макро-компьютера или в зависимости от окружения.

Таким образом, создав один единственный универсальный ассемблер, способный создавать копию себя, мы через несколько часов получим целую армию этих крошек, которые в буквальном смысле слова изменят нашу жизнь.

Самой большой проблемой ассемблеров является сложность их первоначального конструирования. Тем не менее, лаборатории всех мировых держав борются за право быть первыми в этом революционном прорыве.

Возможности использования нанотехнологий неисчерпаемы – начиная от "проживающих" в организме нанокомпьютеров, убивающих раковые клетки и ремонтирующих поврежденные ткани и органы и заканчивая автомобильными двигателями, не загрязняющими окружающую среду.

16.3. Материалы для нанотехнологий

Еще Демокрит в своей атомистической концепции Вселенной обратил внимание на то, что мир состоит из множества "кирпичиков" – химических элементов и их соединений, различающихся между собой особыми свойствами. Как неодинаковы свойства каждого из "кирпичей мироздания", так неодинаковы и их истории. Одни элементы, такие, как медь, железо, сера, углерод, известны с доисторических времен. Возраст других измеряется только веками, несмотря на то, что ими, даже не открытыми, человечество пользовалось всегда (например, кислород был открыт лишь в XVIII веке). Третьи были открыты 100-200 лет тому назад, но приобрели первостепенную важность лишь в наше время. К ним относятся уран, алюминий, бор, литий, бериллий и др. У четвертых рабочая биография начинается только сегодня.

16.3.1. Фуллерены

В 1985 году Роберт Керл, Гарольд Крото и Ричард Смолли неожиданно открыли принципиально новое углеродное соединение – фуллерен, уникальные свойства которого вызвали целый шквал исследований. В 1996 году первооткрывателям фуллеренов присуждена Нобелевская премия.

Основой молекулы фуллерена является углерод – этот уникальнейший химический элемент, отличающийся способностью соединяться с большинством элементов и образовывать молекулы самого различного состава и строения. Углерод имеет два основных аллотропных состояния – графит и алмаз. С открытием фуллерена, можно сказать, углерод приобрел еще одно аллотропное состояние.

Рассмотрим структуры молекул графита, алмаза и фуллерена.

Графит обладает слоистой структурой (рис. 16.7). Каждый его слой состоит из атомов углерода, связанных ковалентной связью друг с другом в правильные шестиугольники. Соседние слои удерживаются вместе слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Поэтому они легко скользят

друг по другу. Примером этого может служить простой карандаш – если провести графитовым стержнем по бумаге, слои постепенно "отслаиваются" друг от друга, оставляя на ней след.

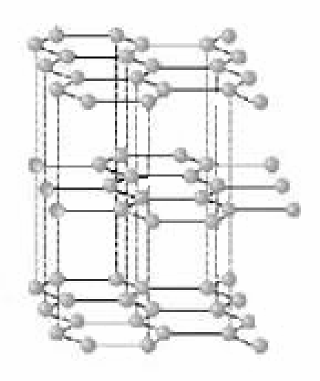


Рис. 16.7. Структура графита

Алмаз имеет трехмерную тетраэдрическую структуру (рис. 16.8). Каждый атом углерода связан ковалентной связью с четырьмя другими. Все атомы в кристаллической решетке расположены на одинаковом расстоянии (154 нм) друг от друга. Каждый из них связан с другими прямой ковалентной связью и образует в кристалле, каких бы размеров он ни был, одну гигантскую макромолекулу.

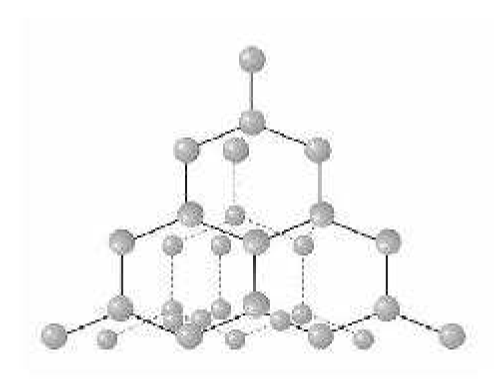


Рис. 16.8. Структура алмаза

Благодаря высокой энергии ковалентных связей С – С, алмаз обладает высочайшей прочностью и используется не только как драгоценный камень, но и в качестве сырья для изготовления металлорежущего и шлифовального инструмента (возможно, читателям доводилось слышать об алмазной обработке различных металлов)

Фуллерены получили свое название в честь архитектора Бакминстера Фуллера, который придумал подобные структуры для использования их в архитектурном строительстве (поэтому их также называют бакиболами). Фуллерен имеет каркасную структуру, очень напоминающую футбольный мяч, состоящий из “заплаток” 5-ти и 6-тиугольной формы. Если представить, что в вершинах этого многогранника находятся атомы углерода, то мы получим самый стабильный фуллерен С60 (рис. 16.9).



Рис. 16.9. Структура фуллерена

В молекуле C60, которая является наиболее известным, а также наиболее симметричным представителем семейства фуллеренов, число шестиугольников равно 20. При этом каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками, а каждый шестиугольник имеет три общие стороны с шестиугольниками и три – с пятиугольниками (рис. 16.10).

Структура молекулы фуллерена интересна тем, что внутри такого углеродного "мячика" образуется полость, в которую благодаря капиллярным свойствам можно ввести атомы и молекулы других веществ, что дает, например, возможность их безопасной транспортировки.

По мере исследования фуллеренов были синтезированы и изучены их молекулы, содержащие различное число атомов углерода - от 36 до 540.

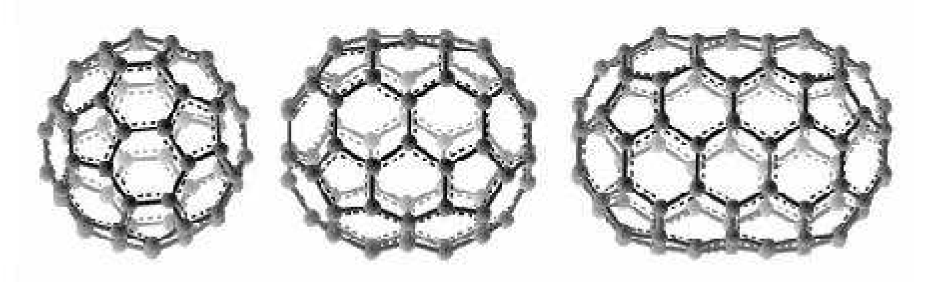


Рис. 16.10. Представители фуллеренов: C60, C70, C90

16.3.2. Нанотрубки

В 1991 году японский профессор Сумио Иидзима обнаружил длинные углеродные цилиндры, получившие названия нанотрубок.

Нанотрубка – это молекула из более миллиона атомов углерода, представляющая собой трубку с диаметром около нанометра и длиной несколько десятков микрон. В стенках трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников.

Структуру нанотрубок можно представить себе так: берем графитовую плоскость, вырезаем из нее полоску и "склеиваем" ее в цилиндр (на самом деле, конечно, нанотрубки растут по-другому) (рис. 16.11). Казалось бы, что может быть проще – графитовая плоскость, свернутая в цилиндр, – однако до экспериментального открытия нанотрубок никто из теоретиков их не предсказывал.

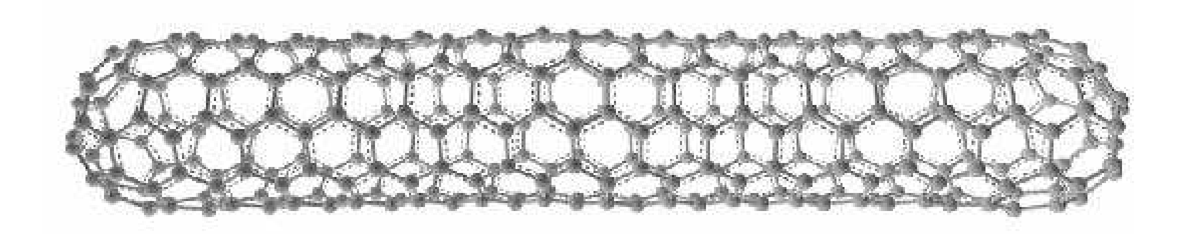


Рис. 16.11. Структура нанотрубки

Различают металлические и полупроводниковые нанотрубки. Металлические нанотрубки проводят электрический ток даже при абсолютном нуле температур, в то время как проводимость полупроводниковых трубок равна нулю при абсолютном нуле и возрастает при повышении температуры.

Применение нанотрубок. Нанотрубки в 100 тысяч раз тоньше человеческого волоса оказались прочным материалом. Нанотрубки в 50 – 100 раз прочнее стали [15] и имеют в шесть раз меньшую плотность. Модуль Юнга – уровень сопротивления материала деформации – у нанотрубок вдвое выше, чем у обычных углеродных волокон. То есть трубки не только прочные, но и гибкие, и напоминают по своему поведению не ломкие соломинки, а жесткие резиновые трубки. Под действием механических напряжений нанотрубки не "рвутся" и не "ломаются", а перестраиваются.

Эти необычные свойства нанотрубок можно использовать для создания искусственных мускулов, которые при одинаковом объеме могут быть вдесятеро сильнее биологических, не боятся высоких температур, вакуума и многих химических реагентов.

Из нанотрубок можно создать сверхлегкие и сверхпрочные композиционные материалы, чтобы шить из них одежду, не стесняющую движений, для пожарных и космонавтов. Нанокабель от Земли до Луны из одиночной трубки можно было бы намотать на катушку размером с маковое зернышко. Небольшая нить диаметром 1мм, состоящая из нанотрубок, могла бы выдержать груз в 20 т, что в несколько сотен миллиардов раз больше ее собственной массы.

В настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет десятки и сотни микрон – что, конечно, очень велико по атомным масштабам, но слишком мало для повседневного использования. Однако длина, получаемых нанотрубок, постепенно увеличивается – сейчас ученые уже вплотную подошли к сантиметровому рубежу. Получены многослойные нанотрубки длиной 4 мм. Поэтому есть все основания надеяться, что в скором будущем ученые научатся выращивать нанотрубки длиной в метры и даже сотни метров.

Безусловно, это сильно повлияет на будущие технологии: ведь невидимый невооруженным взглядом "трос" в тысячи раз тоньше человеческого волоса и способный удерживать груз в сотни килограмм, найдет бесчисленное множество применений.

Нанотрубки бывают самой разной формы: однослойные и многослойные, прямые и спиральные. Кроме того, они демонстрируют целый спектр самых неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств.

Например, в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости, нанотрубки могут быть как проводниками, так и полупроводниками электричества. Электронные свойства нанотрубок можно целенаправленно менять путем введения внутрь трубок атомов других веществ.

Разработано также несколько применений нанотрубок в компьютерной индустрии. Уже появились эмиссионные мониторы с плоским экраном, работающие на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, другой конец начинает испускаться электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают свечение пикселя. Получающееся при этом зерно изображения будет фантастически малым: порядка микрона.

Другой пример – использование нанотрубки в качестве иглы сканирующего микроскопа. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам такая заточка все равно достаточно грубая. Нанотрубка же представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких атомов. Прикладывая определенное напряжение, можно подхватывать атомы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место.

Необычные электрические свойства нанотрубок сделают их одним из основных материалов наноэлектроники. На их основе изготовлены новые элементы для компьютеров. Эти элементы обеспечивают уменьшение устройств по сравнению с кремниевыми на несколько порядков. Сейчас активно обсуждается вопрос о том, в какую сторону пойдет развитие электроники после того, как возможности дальнейшей миниатюризации электронных схем на основе традиционных полупроводников будут полностью исчерпаны (это может произойти в ближайшие 5 лет). И нанотрубкам отводится бесспорно лидирующее положение среди перспективных претендентов на место кремния.

Еще одно применение нанотрубок в наноэлектронике – создание полупроводниковых гетероструктур, т.е. структур типа "металл-

полупроводник" или стык двух разных полупроводников (нанотранзисторы).

Теперь для изготовления такой структуры не надо будет выращивать отдельно два материала и затем "сваривать" их друг с другом. Все, что требуется, это в процессе роста нанотрубки создать в ней структурный дефект (а именно, заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником) просто надломив его посередине особым образом. Тогда одна часть нанотрубки будет обладать металлическими свойствами, а другая – свойствами полупроводников.

Нанотрубки – идеальный материал для безопасного хранения газов во внутренних полостях. В первую очередь это относится к водороду, который давно стали бы использовать как топливо для автомобилей, если бы громоздкие, толстостенные, тяжелые и небезопасные баллоны для хранения водорода не лишали водород его главного преимущества – большого количества энергии, выделяемой на единицу массы (на 500 км пробега автомобиля требуется всего около 3 кг H_2).

Ввиду того, что запасы нефти на нашей планете не бесконечны, то автомобиль на водородном топливе был бы эффектным решением многих экологических проблем. Поэтому, возможно, скоро вместо традиционного бензина новые водородные "бензобаки" с нанотрубками будут заполнять водородным топливом стационарно под давлением, а извлекать – небольшим подогреванием такого "водородобака". Чтобы превзойти обычные газовые баллоны по плотности запасенной энергии, нужны нанотрубки с полостями относительно большого диаметра – более 2–3 нм.

В нанотрубки можно не только "загонять" атомы и молекулы поодиночке, но и буквально "вливать" вещество. Как показали эксперименты, открытая нанотрубка обладает капиллярными свойствами, то есть она как бы втягивает в себя вещество. Таким образом, нанотрубки можно использовать как микроскопические контейнеры для перевозки и хранения химически или биологически активных веществ: белков, ядовитых газов, компонентов топлива и даже расплавленных металлов.

Попав внутрь нанотрубки, атомы или молекулы уже не могут выйти наружу: концы нанотрубок надежно "запаяны", а углеродное кольцо слишком узко для большинства атомов чтобы "пролезть" через него. В таком виде активные атомы или молекулы можно безопасно транспортировать. Попав в место назначения, нанотрубки раскрываются с одного конца и выпускают свое содержимое в строго определенных дозах. Это не фантастика, эксперименты такого рода уже сейчас проводятся во многих лабораториях, а операции "запаивания" и "распаива-

ния" концов нанотрубок вполне под силу современной технологии. Уже создана нанотрубка с одним закрытым концом.

Также не исключено, что через 10 лет на базе этой технологии будет проводиться лечение заболеваний: скажем, больному вводят в кровь заранее приготовленные нанотрубки с очень активными ферментами, эти нанотрубки собираются в определенном месте организма некими микроскопическими механизмами и "вскрываются" в определенный момент. Современная технология уже практически готова к реализации такой схемы через 3 – 4 года. Основной проблемой является отсутствие эффективных методов "открывания" таких механизмов и их интеграции в белковые маркеры для поиска клеток-мишеней.

Возможно, создадут и более эффективные методы доставки лекарств на основе вирусов и нанокапсул. На основе нанотрубок также создан конвейер, способный точно транспортировать отдельные атомы с большими скоростями вдоль нанотрубки.

16.3.3. Ультрадисперсные наноматериалы

Дисперсность – это степень раздробленности вещества на частицы. Чем меньше размер отдельной частицы, тем выше дисперсность. Большинство веществ окружающего нас мира существуют в виде дисперсных систем, например, грунты и почвы, многие технические материалы (песок, различные порошки и т.д.), некоторые продукты (соль, сахар, крупа). По степени дисперсности частицы можно разделить на грубодисперсные, высокодисперсные (или коллоидные), размер которых колеблется в пределах от 10^{-5} до 10^{-7} м, и ультрадисперсные, соответственно, нанометрового порядка.

Повышенный интерес ученых к наноматериалам объясняется тем, что уменьшение дисперсности частиц какого-либо вещества может приводить к заметным изменениям их свойств. Так, еще в XIX веке Майкл Фарадей, впервые создав коллоидную суспензию золота, состоящую из крошечных частиц этого металла, обнаружил, что ее цвет менялся на фиолетовый, что свидетельствует об изменении отражающих свойств суспензии при уменьшении размеров частиц.

В последнее время стало известно, что наночастицы серебра имеют антибактериальный эффект, что делает их полезными для лечения от многих болезней. Это свойство серебра еще в древности заметили служители церкви, используя серебро для приготовления “святой” воды. Но в виде наночастиц антибактериальная активность серебра повышается в тысячи раз.

Отличие свойств малых частиц от свойств массивного материала известно уже достаточно давно и используется в разных областях тех-

ники. Примерами могут служить широко применяемые аэрозоли, красящие пигменты, получение цветных стекол благодаря окрашиванию их коллоидными частицами металлов. Малые частицы и наноразмерные элементы используются для производства различных авиационных материалов. Например, в авиации применяются радиопоглощающие керамические материалы, в матрице которых беспорядочно распределены ультрадисперсные металлические частицы.

Суспензии металлических наночастиц (обычно железа или меди) размером от 30 нм используют как присадки к моторным маслам для восстановления изношенных деталей автомобильных и других двигателей непосредственно в процессе работы.

Ультрадисперсные материалы обычно не встречаются в природе в свободном состоянии, а представляют собой искусственный продукт. В настоящее время существует большое количество способов измельчения веществ, например: механическое дробление (для получения различных порошков), резание (получение стружки), измельчение в шаровых, вибрационных и вихревых мельницах, измельчение ультразвуком и др.

Наночастицы производятся и при помощи нанотехнологии, в частности, туннельно-зондовыми методами, использующими возможности современных сканирующих микроскопов манипулировать отдельными атомами. И, конечно же, большие успехи в этом направлении будут достигнуты после создания ассемблеров – сборщиков атомных структур.

Сотни миллионов этих волосков позволяют цепляться за малейшие неровности поверхности. Даже совершенно гладкое, на наш взгляд, стекло дает гекконам достаточно возможностей зацепиться. Как, оказалось, здесь работают силы Ван-дер-Ваальса, или, говоря иначе, силы межмолекулярного взаимодействия. Теория Ван-дер-Ваальса основывается на квантовой механике. Молекулы веществ на малых расстояниях отталкиваются, а на больших притягиваются (тот же принцип положен в основу работы АСМ).

Когда геккон опускает лапку на поверхность, лопаточки на концах нанощетинок столь плотно прилегают к ней, что лапка как бы прилипает к вертикальной стене или потолку. Но чуть геккон напряжет мышцы и потянет лапку - силы Ван дер Ваальса исчезают, и она легко отделяется от поверхности.

Силы Ван-дер-Ваальса очень малы, однако расположение волосков на пальчиках гекконов позволяет обеспечить достаточно большую поверхность взаимодействия, чтобы ящерица могла удержаться, напри-

мер, на потолке при помощи всего одного пальца своей пятипалой лапы или кончика хвоста.

Все это побудило исследователей к попыткам использовать сделанное открытие. Сотрудники американской компании iRobot сконструировали робота, который может передвигаться вертикально по стенкам аквариума. В дальнейшем планируется снабдить его искусственными волосками и увеличить прижимающую силу. А если удастся прикрепить к роботу хвост геккона, он сможет бегать по острым граням.

Если эксперименты по созданию ящероподобных роботов будут успешными, эти механизмы можно будет использовать в самых разных областях – от мытья окон в высотных зданиях до путешествий по пыльным тропинкам далеких планет.

Можно положить данный принцип в основу изготовления липкой ленты, подобной скотчу, которую можно использовать повторно и даже в вакууме (обычный скотч в космосе не работает).

Ведутся разработки нового поколения так называемых "сухих клеев" с широким диапазоном характеристик, которые будут обеспечивать высокую адгезию (липучесть) на основе электростатики.

Можно изготовить обувь и перчатки, прочно удерживающие человека на вертикальной стене. Они облегчили бы жизнь не только альпинистам, монтажникам-скалолазам, но и всем остальным людям.

16.4. Оборудование для нанотехнологий

Любая технология, например, обработка материала на макро, микро или наноуровне, не может обходиться без средств измерения соответствующих величин. Среди многообразия измерительных приборов, существуют специальные приборы для измерения как больших, так и малых расстояний.

Так, малые расстояния вплоть до миллиметрового (10^{-3} м) порядка легко измеряются с помощью обычной линейки. Ею можно измерить, например, толщину куска плотного картона. Однако для меньших размеров линейка уже не годится. Если попытаться измерить с ее помощью толщину волоса, то единственное, что можно будет сказать – это то, что волос очень тонкий, что очевидно и без измерений. Поэтому, чтобы идти дальше в сторону еще меньших расстояний, необходимы увеличительные приборы, например, обычный оптический микроскоп.

Оптический микроскоп, позволяет видеть мелкие детали, величиной до 0,25 мкм. Дальнейшие способы улучшения микроскопа, работающего на принципах оптики, привели к созданию его электронного варианта, с помощью которого удается наблюдать предметы с размерами порядка нанометра. Электронный микроскоп позволяет различать

даже атомные решетки, но обнаружить в них дефекты он не может. Для целей нанотехнологии нужно хорошо визуализировать отдельные атомы.

Поэтому когда все возможности данного устройства были исчерпаны, ученые принялись искать новые пути решения поставленной задачи. В начале XX века появилась оригинальная идея изучать вещество, не увеличивая визуально исследуемую площадь его поверхности, а прикасаясь к ней. На основе туннельного эффекта в 1981 году был создан первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).

Туннельный эффект является принципиально квантово-механическим эффектом, не имеющим аналога в классической физике и потому представляет огромный интерес для исследователей. Он основан на корпускулярно-волновом дуализме – двойственной природе элементарных частиц.

С точки зрения классической механики, очевидно, что никакое материальное тело, имеющее энергию E , не может преодолеть потенциальный барьер высотой V_0 , если $V_0 > E$. Например, если принять за материальное тело мяч, а за потенциальный барьер – очень высокий бетонный забор, то понятно, что если кинуть мяч в сторону забора недостаточно высоко – так, что его энергии не хватит на перелет стоящего перед ним барьера, то он, ударившись о преграду, отскочит назад (рис. 16.12).

Однако если в качестве материального тела рассмотреть электрон, то оказывается, что даже если высота потенциального барьера выше, чем собственная энергия электрона, то он с определенной вероятностью может оказаться с другой стороны барьера, лишь незначительно изменив свою энергию, как если бы в "заборе" оказалась некая "дырка" или туннель.

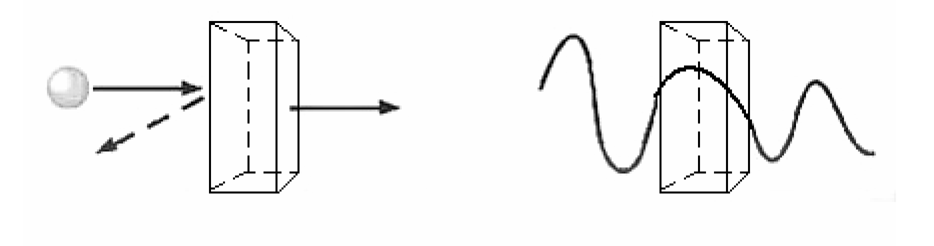


Рис. 16.12. Туннельный эффект

Это туннелирование является следствием того, что электрону присущи как корпускулярные, так и волновые свойства. Будь электрон

классической частицей, обладающей энергией *E*, он, встретив на своем пути преграду, требующую для преодоления большей энергии, должен был бы отразиться от этой преграды. Однако, являясь одновременно и волной, он проходит сквозь эту преграду, подобно тому, как рентгеновские волны свободно проходят сквозь материальные объекты.

Таким образом, над поверхностью любого проводника или полупроводника всегда наблюдается некоторое количество свободных электронов, "вышедших" за его пределы не в результате термоэлектронной эмиссии, а благодаря туннельному эффекту.

Если взять два проводящих вещества, расположить их на расстоянии 0,5нм друг от друга и приложить к ним сравнительно малую разность потенциалов (0,1 – 1В), то между ними возникнет электрический ток, обусловленный туннельным эффектом, который называется туннельным током.

Если повторить тот же опыт, но к поверхности интересующего тела поднести острый предмет, например, очень тонкую иглу с кончиком в атом толщиной, то, проводя ею над изучаемым объектом (сканируя его поверхность) можно получать информацию о строении объекта на атомном уровне.

Сканирующий туннельный микроскоп. В 1981 году сотрудники компании IBM Г. Бининг и Г. Рорер на основе этого явления построили первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и в 1982 г., с его помощью впервые в истории получили изображение поверхности золота, а затем и кремния с атомарным разрешением (рис. 16.13).

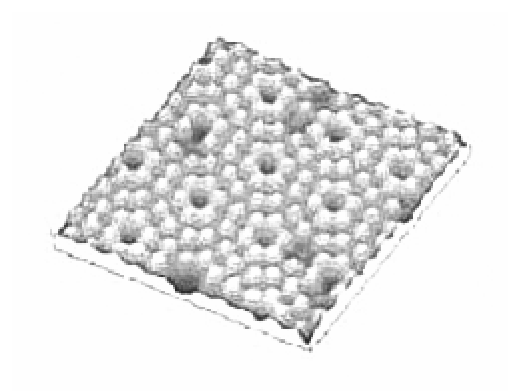


Рис. 16.13. Изображение поверхности монокристаллического кремния в СТМ

За это открытие в 1985 году ученые были удостоены Нобелевской премии, а дальнейшее развитие сканирующей микроскопии привело к бурному развитию нанотехнологий. Огромные возможности СТМ были осознаны не сразу: некоторые научно-популярные издания не печатались.

Рабочим органом СТМ – зондом – служит токопроводящая металлическая игла. Зонд подводится к изучаемой поверхности на очень близкое расстояние (≈ 0,5 нм) и, при подаче на зонд постоянного напряжения, между ними возникает туннельный ток, который экспоненциально зависит от расстояния между зондом и образцом. Это значит, что при увеличении расстояния лишь на 0,1 нм туннельный ток уменьшается почти в 10 раз. Именно это и обеспечивает высокую разрешающую способность микроскопа, поскольку незначительные изменения по высоте рельефа поверхности вызывают существенное изменение туннельного тока.

Поддерживая ток и расстояние постоянным при помощи следящей системы, зонд сканирует поверхность, перемещаясь над нею по осям X и Y , то опускаясь, то поднимаясь в зависимости от ее рельефа (рис. 16.14).

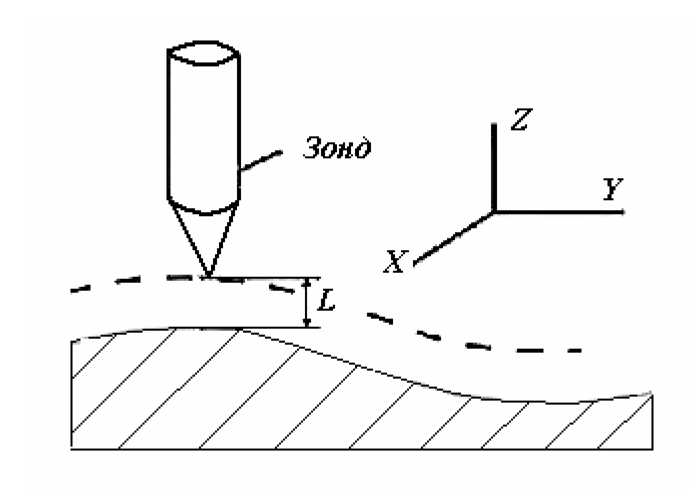


Рис. 16.14. Схема работы СТМ

Информация об этом перемещении отслеживается компьютером, и программно визуализируется, чтобы исследователь мог увидеть на экране объект с нужным разрешением.

Существуют два варианта конструкции СТМ в зависимости от режима сканирования образцов.

В режиме постоянной высоты острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а ток туннелирования изменяется (рис. 16.15 а). Исходя из данных о величине тока туннелирования, измеренной в каждой точке поверхности, строится образ ее рельефа.

В режиме постоянного тока СТМ задействуется система обратной связи для поддержания постоянного тока туннелирования путем подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой ее точке (рис. 16.15 б).

У каждого режима есть преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты быстрее, так как системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх-вниз, но при этом можно получить полезную информацию только с относительно гладких образцов. В режиме постоянного тока можно с высокой точностью изучать сложные поверхности, но он занимает и больше времени.

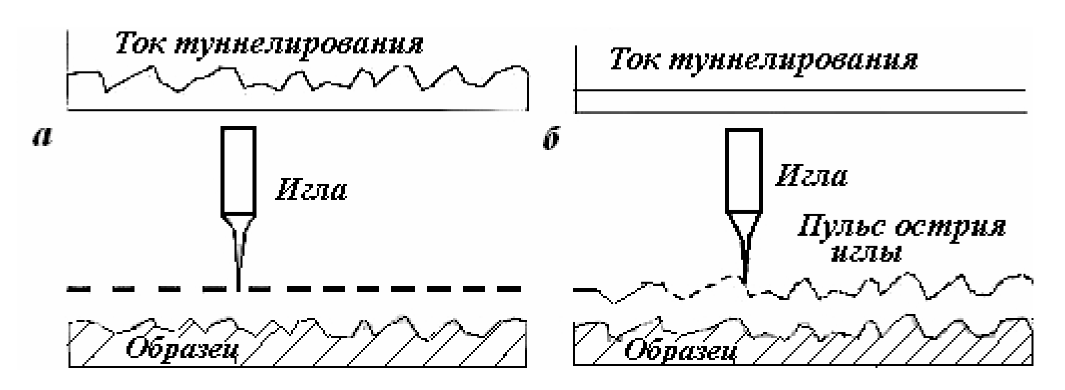


Рис. 16.15. Ток туннелирования

Важной деталью сканирующего туннельного микроскопа является механический манипулятор, который должен обеспечивать перемещение зонда над поверхностью с точностью до тысячных долей нанометра. Обычно механический манипулятор изготавливают из пьезокерамического материала.

Удивительным свойством такого материала является пьезоэффект. Суть его заключается в следующем: если из пьезоматериала вырезать прямоугольную балку, нанести на противоположные стороны металлические электроды и приложить к ним разность потенциалов, то под действием тока произойдет изменение геометрических размеров балки. И, наоборот: при малейшей деформации (сжатии) балки, на ее противоположных концах возникнет разность потенциалов. Таким образом, управляя малыми изменениями тока, можно добиться перемещения зонда на очень малые расстояния, необходимые для работы сканирующего микроскопа.

В практических конструкциях обычно используют пьезокерамические манипуляторы, выполненные в виде тонкостенной трубки с несколькими раздельными электродами. Управляющее напряжение вызывает удлинение или изгиб таких манипуляторов и, соответственно, перемещение зонда по всем трем пространственным координатам X, Y и Z (рис. 16.16).

Конструкции современных манипуляторов обеспечивают диапазон перемещения зонда до 100 – 200 мкм в плоскости и до 5 – 1 2 мкм – по высоте.

Туннельный микроскоп позволил ученым исследовать поверхности на атомном уровне. Однако этот прибор имеет и ряд ограничений. Основанный на туннельном эффекте, он может применяться только для изучения материалов, хорошо проводящих электрический ток.

Но прогресс не стоит на месте, и в 1986 г в лаборатории цюрихского отделения IBM были созданы микроскопы следующего поколения – атомно-силовые (АСМ). АСМ тоже позволяет исследовать поверхности с атомной точностью, но уже вовсе не обязательно электропроводящие. Сегодня именно он представляет наибольший интерес для исследователей.

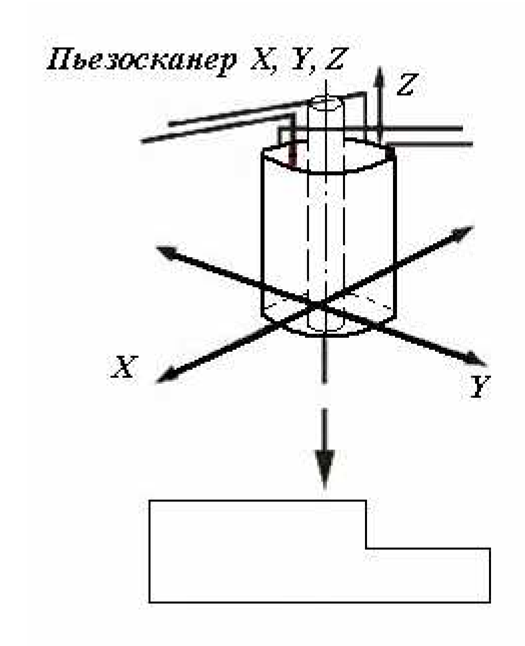


Рис. 16.16. Схема типичного пьезоманипулятора

Принцип действия атомно-силового и туннельного микроскопов практически одинаковы, только в отличие от туннельного, атомно-силовой микроскоп основан на использовании сил межатомных связей. На малых расстояниях (около 0,1нм) между атомами двух тел действуют силы отталкивания (рис. 16.17 б), а на больших – силы притяжения (рис. 16.17 а).

В сканирующем атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над нею острие. В качестве зонда в АСМ обычно используется алмазная игла. При изменении силы F, действующей между поверхностью и острием, пружинка, на которой оно закреплено, отклоняется, и это регистрируется датчиком. Величина

отклонения упругого элемента (пружинки) несет информацию о рельефе поверхности.

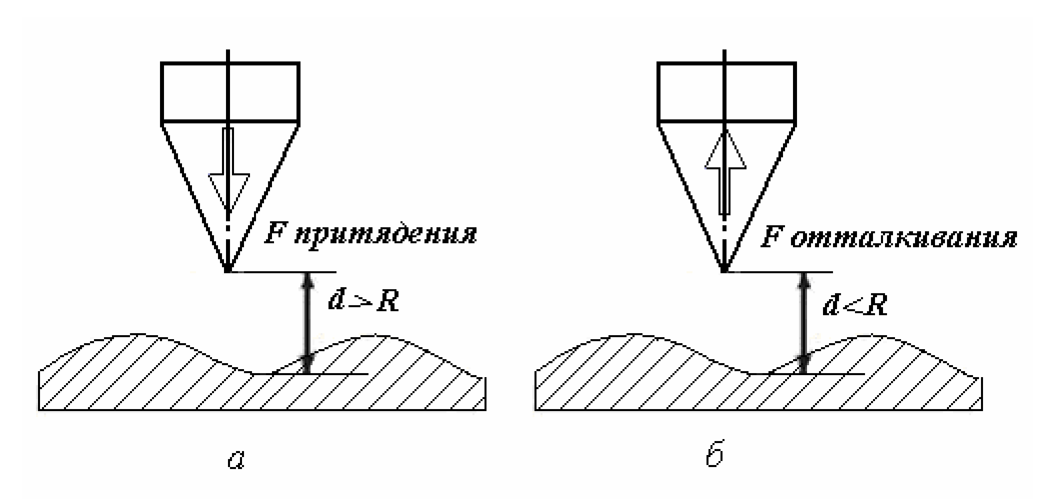


Рис. 16.17. Принцип действия АСМ

На рисунке 16.18 схематически представлена кривая зависимости межатомной силы от расстояния между острием иглы и образцом.

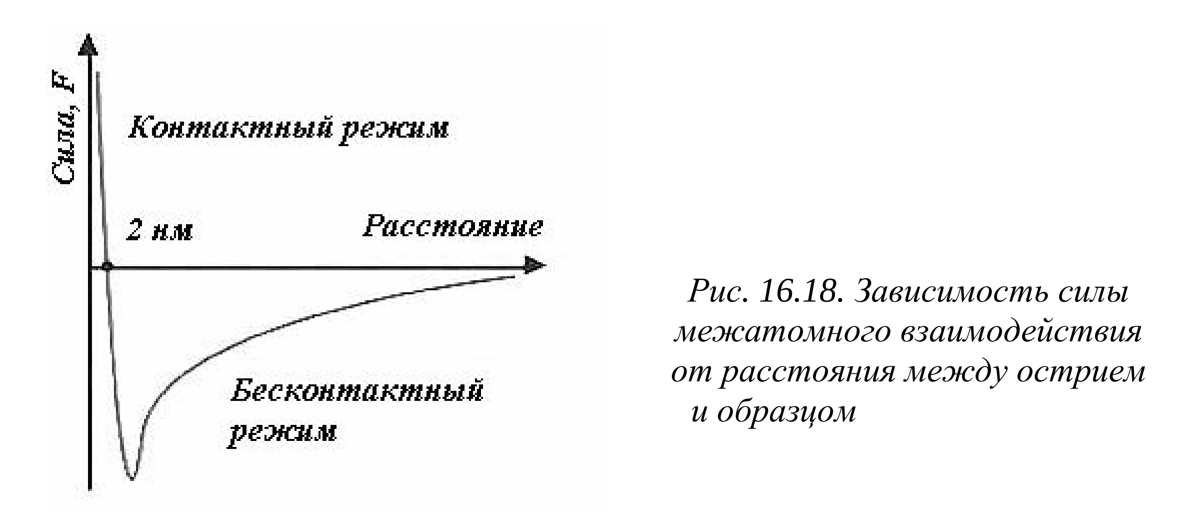


Рис. 16.18. Зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между острием и образцом

По мере приближения иглы к поверхности, ее атомы все сильней притягиваются к атомам образца. Сила притяжения будет возрастать пока игла и поверхность не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут отталкиваться электростатическим полем. При дальнейшем сближении электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравновешиваются на расстоянии между атомами около 0,2 нм.

Подобно СТМ в АСМ сканирование поверхности может происходить двумя способами: сканирование кантилевером и сканирование

подложкой. В первом случае вдоль исследуемой поверхности движется кантилевер, во втором относительно неподвижного кантилевера движется сама подложка.

Для регистрации сил взаимодействия зонда с поверхностью обычно используют метод, основанный на регистрации отклонения лазерного луча, отраженного от кончика зонда. Луч направляется на самый кончик кантилевера, покрытый специальным алюминиевым зеркальным слоем, после чего попадает в специальный четырёхсекционный фотодиод (рис. 16.19).

Таким образом, малейшие отклонения кантилевера приводят к смещению луча лазера относительно секций фотодиода, что, в свою очередь, меняет сигнал с фотодиода, показывающего смещения кантилевера в ту или иную сторону. Такая система позволяет измерять отклонения луча на угол 0.1", что соответствует отклонению кантилевера всего на сотые доли нанометра.

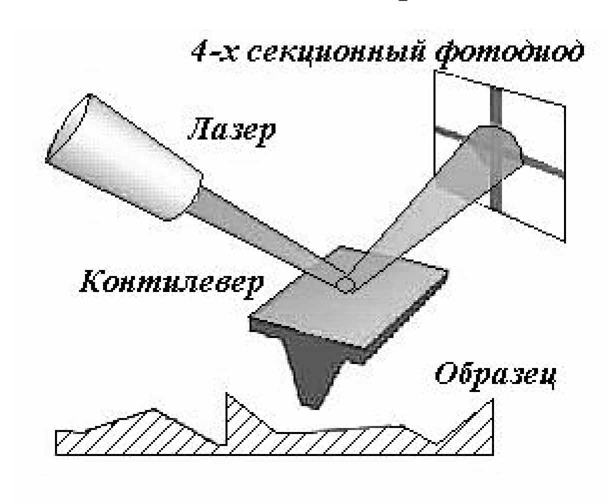


Рис. 16.19. Схема регистрации отклонения лазерного луча от начального откалиброванного положения

Поскольку АСМ не требует, чтобы образцы были проводящими, он позволяет исследовать свойства проводников и изоляторов, молекул ДНК и других мягких материалов.

Сканирующий зондовый микроскоп. Дальнейшее развитие зондовой микроскопии показало, что изложенный принцип может быть реализован практически для любого вида взаимодействия острия зонда с поверхностью. Это привело к созданию целого ряда различных подвидов микроскопов, носящих общее название – сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Сегодня наиболее известны следующие их разновидности:

-туннельные зонды;

-атомно-силовые зонды;

-магнитные силовые зонды;

-оптические зонды ближнего поля;

-электростатические силовые зонды и др.

На рисунке 16.20 представлена общая схема СЗМ.

В конструкции каждого сканирующего зондового микроскопа есть свои особенности. Однако общая схема остается более или менее одинаковой. В состав СЗМ обычно входит компьютер, который управляет работой электромеханической части микроскопа, принимает и записывает регистрируемые зондом данные и производит на их основе построение СЗМ-изображения. Кроме того, специальное программное обеспечение позволяет исследователю, как угодно манипулировать полученным изображением (масштабировать, поворачивать, строить сечения и т.п.) чтобы проанализировать наблюдаемую картину поверхности.

Сегодня СЗМ являются основными инструментами нанотехнологии. Благодаря значительным усовершенствованиям, они позволяют изучать не только топологию (геометрические свойства) исследуемых объектов, но и массу других характеристик: магнитные и электрические свойства, твердость, однородность состава и др. и все это с нанометровым разрешением.

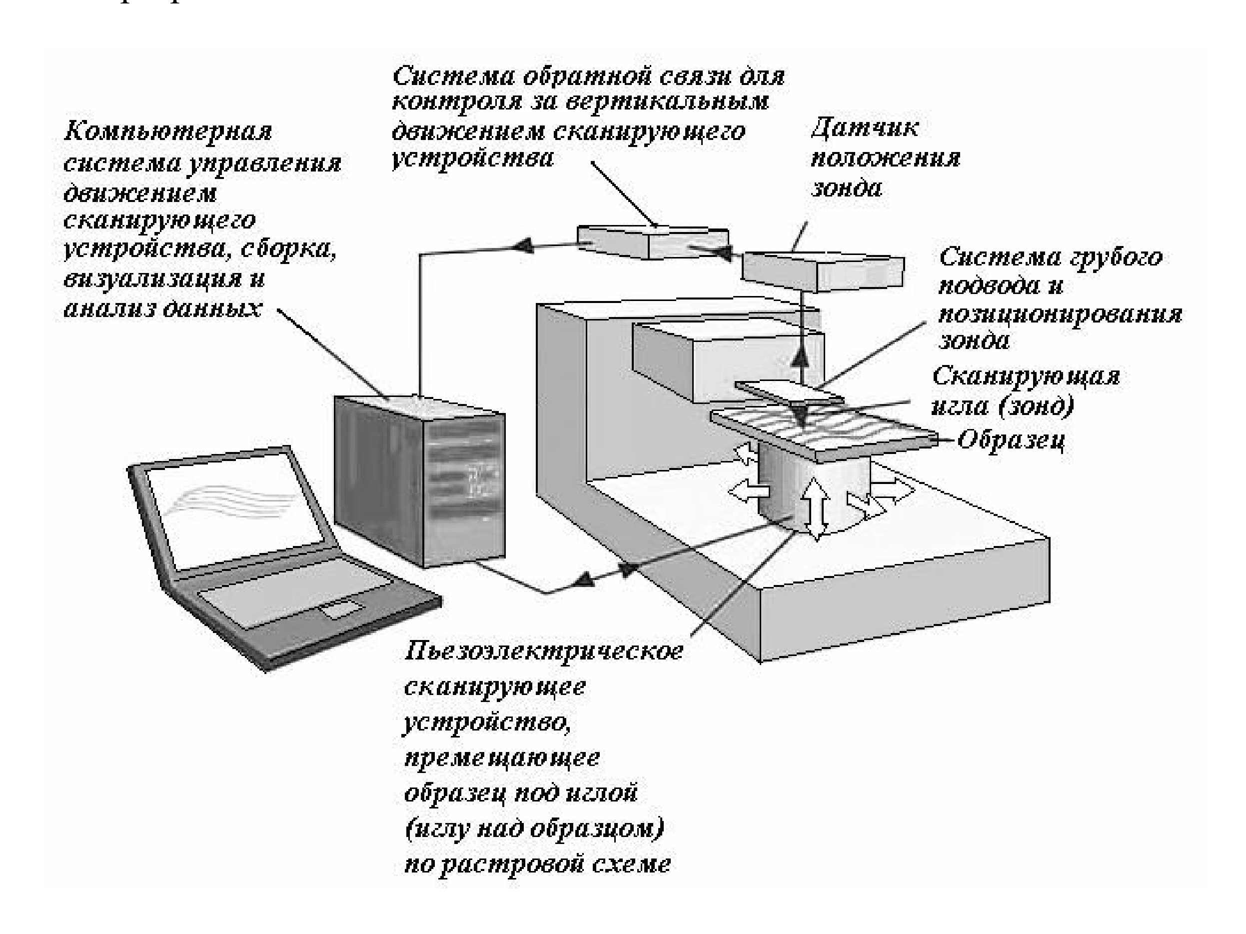


Рис. 16.20. Общая схема работы СЗМ

Кроме определения различных параметров, современные СЗМ позволяют манипулировать нанообъектами, обеспечивать захват отдельных атомов и перенос их в новую позицию, производить атомарную сборку проводников шириной в один атом, придавая тем самым поверхностям различных предметов новые нужные качества.

Существуют два основных способа манипуляции атомами с помощью иглы СТМ – горизонтальный и вертикальный. При вертикальной манипуляции после захвата нужный атом отрывают от поверхности, поднимая зонд на несколько ангстрем. Отрыв атома от поверхности контролируют по скачку тока. Разумеется, отрыв и перетаскивание атома требует больших усилий, чем просто его "перекатывание" по поверхности, как при горизонтальной манипуляции, но зато потом процесс переноса не зависит от встречающихся на поверхности препятствий (ступеней, ям, адсорбированных атомов). После перемещения в необходимое место атом "сбрасывают", приближая острие к поверхности и переключая напряжение на игле.

В настоящее время в мире в широком ассортименте выпускаются СЗМ и принадлежности к ним. Среди наиболее известных фирм известны Digital Instruments , Park Scientific Instruments , Omicron , Topometrix , Burleigh и др.

16.5. Развитие нанотехнологий

Сегодня благодаря прорыву в области производства микроскопов, современные ученые могут манипулировать атомами и располагать их так, как необходимо для достижения поставленной задачи. Это принципиально новые возможности, которых не было за всю историю развития человечества.

16.5.1. Новейшие достижения

Графен. В Манчестерском университете (The University Of Manchester) было создано небольшое количество материала, названного графеном. Предполагается, что этот материал может служить подложкой для создания алмазных механосинтетических устройств.

Геомодификаторы. Создан способ формирования антифрикционного покрытия трущихся поверхностей, основанный на использовании специального состава-геомодификатора трения: "композиции силикатно-керамической" (КСК), торговая марка "MEGAFORCE". КСК вводится между трущимися поверхностями при помощи носителя (масла, консистентные смазки, фреон, антифризы, и т. д.). В результате чего, в процессе эксплуатации, на поверхностях трения образуется слой метал-

локерамики, составляющий с поверхностью детали единое целое. Компоненты состава обладают всеми свойствами наночастиц, в том числе саморегуляцией процессов образования металлокерамики, в зависимости от состояния поверхности.

Транзистор из нанотрубок. В Стенфордском университете (Stanford University) удалось создать транзистор из одностенных углеродных нанотрубок и некоторых органических материалов. Нанотрубки играли роль электродов, а помещенный между ними органический материал – полупроводника. Это устройство имело длину 3 нм и ширину 2 нм.

Новый процессор Intel. Компания Intel создала прототип процессора, содержащего наименьший структурный элемент размерами примерно 65 нм. В дальнейшем компания намерена достичь размеров структурных элементов до 5 нм. Данный прототип использует комплементарные металл-оксидные полупроводники, но в дальнейшем компания намерена перейти на новые материалы, такие как квантовые точки, полимерные пленки и нанотрубки.

Плазмон. Плазмоны – коллективные колебания свободных электронов в металле. Характерной особенностью возбуждения плазмонов можно считать так называемый плазмонный резонанс. Длина волны плазмонного резонанса, например, для сферической частицы серебра диаметром 50 нм составляет примерно 400 нм, что указывает на возможность регистрации наночастиц далеко за границами дифракционного предела (длина волны излучения много больше размеров частицы). Благодаря быстрому прогрессу в технологии изготовления частиц наноразмеров, был дан толчок к развитию новой области нанотехнологии – наноплазмонике. Оказалось возможным передавать электромагнитное излучение вдоль цепочки металлических наночастиц с помощью возбуждения плазменных колебаний.

Антенна-осциллятор. Дальнейшие исследования направлены на создание осцилляторов для телекоммуникаций. В лаборатории Бостонского университета была получена антенна-осциллятор размерами порядка 1 мкм. Это устройство насчитывает 50 миллионов атомов и способно осциллировать с частотой 1,49 ГГц. Это позволит передавать с ее помощью большие объемы информации.

Наноаккумулятор. Компания Altair Nanotechnologies (США) объявила о создании инновационного материала для электродов литий-ионных аккумуляторов. Аккумуляторы с $Li_4Ti_5O_{12}$ электродами имеют время зарядки 10 – 15 минут. Компания начала производство аккумуляторов на своём заводе в Индиане. Altairnano и компания Boshart

Engineering заключили соглашение о совместном создании электромобиля и успешно завершились испытания автомобильных наноаккумуляторов. Altair Nanotechnologies получила первый заказ на поставку литий-ионных аккумуляторов для электромобилей. Заказ поступил от компании Phoenix Motorcars (США).

Гибкие процессоры тоньше человеческого волоса. Межуниверситетский Центр Микроэлектроники (IMEC, Interuniversity Microectronics Center) и Департамент Информационных Технологий Гентского Университета (Department of Information Technology (INTEC) of the University of Ghent) сообщили о совместной разработке новой технологии упаковки ультратонких микропроцессоров, что позволяет создавать гибкие чипы, толщина которых не превышает 50 мкм.

Процесс упаковки чипов подразумевает использование кремниевых кристаллов толщиной 20 – 30 мкм, которые располагаются на 20мкм чрезвычайно прочном и химически стойком органическом полимерном слое. В качестве связующего звена между чипом и подложкой в данном случае используется еще один органический материал – бициклобутан, а для формирования контактов ученые использовали тонкий слой сплава титана и вольфрама, толщина которого составляет 1 мкм.

Достижение исследователей позволит создавать на основе представленных гибких процессоров самые разнообразные устройства – гибкие дисплеи, гибкие электронные системы, используемые, в том числе, и в устройствах потребительской электроники.

Тем не менее, перед массовым использованием новой технологии исследователи должны провести ряд экспериментов, которые позволят улучшить свойства микропроцессоров и снизить стоимость их производства. Не стоит ожидать слишком многого от новых устройств – используемые для создания гибких чипов кристаллы не отличаются высокой производительностью, и лишь позволяют сделать конечные продукты более компактными и дешевыми.

Электронная бумага. Прежде всего, это электронная бумага на основе пластика. Она может заменить бумагу, на которой пишут, позволяя загружать в нее данные. Электронная бумага выглядит самым впечатляющим применением новой технологии (рис. 16.21).

Электронные багажные и инвентарные ярлыки помогут легче отслеживать движение грузов. Регулируемые лазеры и управляемое электронным способом оптоволокно – повысить качество будущих телекоммуникаций. Новая технология не угрожает значению кремния как основы компьютерных микросхем, но создает целый класс новых приложений.



Рис. 16.21. Электронная бумага

Дисплеи. Объём производства электронных компонентов из органических материалов, таких как дисплеи, на основе органических светодиодов (Organic Light Emitting Device, OLED) и органических транзисторов, значительно вырастет.

Применение OLED-экранов больше не ограничено MP3-плеерами и мобильными телефонами, они стали составной частью концепции развития мобильных технологий. В качестве примера можно привести серию ноутбуков «ebook» от LG Electronics и ультратонкие телефоны от Sony Ericsson. Производителей беспроводных устройств всё больше привлекает низкий уровень энергопотребления и высокое качество визуализации при применении OLED-технологии.

16.5.2. Перспективы развития

Идеальная техническая система – это система, масса, габариты и энергоемкость которой стремятся к нулю, а ее способность выполнять работу при этом не уменьшается. Предельный случай идеализации техники заключается в уменьшении её размеров, при одновременном увеличении количества выполняемых ею функций. В идеале – технического устройства не должно быть видно, а функции, нужные человеку и обществу должны выполняться.

На практике хорошей иллюстрацией идеальных технических устройств может служить постоянное стремление производителей микроэлектроники и бытовой техники к миниатюризации, созданию устройств всё меньших размеров, со все большими функциональными возможностями. Примером являются сотовые телефоны или ноутбуки: размер все уменьшается, в то время как функциональность только растет.

Таким образом, нанотехнологии и наноустройства являются закономерным шагом на пути совершенствования технических систем. И, возможно, не последним: за областью нановеличин лежат области пико (10^{-12}), фемто (10^{-15}), атто (10^{-18}) и т.д. величин, с еще неизвестными и непредсказуемыми свойствами.

В настоящее время производителям известны только скромные достижения нанотехнологии – такие как самоочищающиеся ткани и упаковки, позволяющие дольше сохранять свежими продукты питания. Однако ученые предсказывают триумфальное шествие нанотехнологии в недалеком будущем, опираясь на факт её постепенного проникновении во все отрасли производства.

Возможности использования нанотехнологий неисчерпаемы – начиная от микроскопических компьютеров, убивающих раковые клетки, и заканчивая автомобильными двигателями, не загрязняющими окружающую среду.

Нанотехнология станет основой новой промышленной революции, которая приведет к созданию устройств в 100 раз более прочных, чем сталь и не уступающих по сложности человеческим клеткам. Уже создаются, и будут создаваться устройства, основанные на новейших материалах с необычными свойствами. Благодаря обработке на атомарном уровне, привычные материалы будут обладать улучшенными свойствами, постепенно становясь все легче, прочнее и меньше по объему.

16.5.3. Проблемы и опасности

Большие перспективы чаще всего несут с собой и большие опасности. Например, достижения в области атомной энергии и трагичные последствия Чернобыльской аварии.

Ученые всего мира сегодня должно четко представлять себе, что подобные "неудачные" опыты или халатность в будущем могут обернуться такой трагедией.

Опасности в нанотехнологиях начали появляться с 1986 года, после выхода в свет "Машин созидания" Дрекслера, где он описал утопическую картину нанотехнологического будущего. Одну из проблем, которая представляется ему наиболее серьезной, он назвал "проблемой серой слизи" ("grey goo problem").

Опасность серой слизи в том, что нанометровые ассемблеры, вышедшие из-под контроля в результате случайной или намеренной порчи их систем управления, могут начать реплицировать сами себя до бесконечности, потребляя в качестве строительного материала все на своем пути, включая леса, заводы, домашних животных и людей. Расчёт показывает, что теоретически такой ассемблер со своим потомством окажет-

ся в состоянии переработать всю биомассу Земли за считанные часы (расчет не включал учёт времени на перемещение по поверхности планеты).

Предварительный анализ показывает, что ассемблер может быть сделан достаточно надёжным, чтобы вероятность появления самовоспроизводящейся ошибки оказалась пренебрежимо малым. Однако неразумно полностью исключить опасность преднамеренного программирования ассемблера, например террористом, подобным современным создателям компьютерных вирусов.

Другие ученые опровергают опасность "серой слизью", говоря о принципиальной невозможности преодолеть все практические трудности в создании подобных механизмов. Они считают, что будет ошибкой отталкиваться от того, что если простые молекулы имеют способность к репродукции, то инженеры смогут построить сложные наномашины, умеющие делать то же самое. Что касается биологических систем, то они, конечно, способны к репликации, но, во-первых, они намного больше нанометрических масштабов, а во-вторых, фантастически сложны по своей структуре, поскольку включают в себя отдельные системы для хранения и копирования генной информации, системы энергопроизводства, синтеза белков и др.

Тем не менее, возможны другие сферы злоупотребления использованием нанотехнологий. На одной из встреч, посвященных обсуждению их развития, представители научного общества, исследовательских центров и государственных агентств были собраны для обсуждения проблем в этой области, вызывающих беспокойство. Среди возможных проблем, особенно остро вставали вопросы следующего типа:

- Способна ли образовательная система обучить достаточно нанотехнологических специалистов?
- Может ли прогресс нанотехнологий подорвать традиционный бизнес и оставить тысячи людей без работы?
- Может ли снижение стоимости продукции благодаря нанотехнологиям и молекулярной биологии сделать их легкодоступными для террористов для того, чтобы разработать опасные микроорганизмы?
- Каким будет эффект от вдыхания некоторых веществ, которые в настоящее время формируются в молекулярном масштабе? Исследования показали, что та же нанотрубка, представляющая собой соединение сверхтонких игл, имеет структуру, похожую на асбест, а этот материал при вдыхании вызывает повреждение легких.

- Что случится, если в окружающую среду будет выпущено большое количества наноматериала, начиная от компьютерных чипов и заканчивая краской для самолетов?
- Не будут ли наноматериалы вызывать аллергию?
- Не приведет ли вторжение наночастиц в наши тела к непредсказуемым последствиям?
- Они могут быть меньше белков. Что случиться, если наночастицы вызовут пересворачивание белка?

Проблемы со сворачиванием белка могут вызвать, например, болезнь Альцгеймера.

Эти и другие вопросы, стоящие сегодня перед исследователями, очень актуальны и важны. В бешеной гонке нанотехнологий, исследователи и ученые должны взять на себя всю полноту ответственности за жизнь и здоровье других людей, чтобы не оказаться беззаботными фанатиками, совершившими "революцию" только лишь "во имя революции", не утруждая себя размышлениями о возможных трагических последствиях и катастрофах. По всем этим причинам исследование наноэффектов новых технологий будет требовать принципиально новых методов и междисциплинарного подхода.

Контрольные вопросы

1. Кто и когда впервые упомянул о методах, которые впоследствии назовут нанотехнологией?
2. Что такое «нано»?
3. Зачем нужен наномир?
4. Опишите процесс синтеза белка рибосомами.
5. Назначение и внешний вид одной из схем наноассемблера,
6. Структура и область применения фуллеренов.
7. Структура и применение нанотрубок.
8. Ультрадисперсные наноматериалы и области их применения.
9. Инструменты для создания наноструктур.
10. Инструменты для измерения наноструктур.
11. Приведите примеры новейших достижений нанотехнологий.
12. Какие проблемы и опасности возникают при внедрении нанотехнологий?
13. В чем «проблема серой слизи»?

Таблица П1

ПРИЛОЖЕНИЕ

Механические свойства материалов

	Плотность ρ, кг/м^3	Модуль Юнга E, ГПа	Модуль сдви-га G, ГПа	Коэф. Пуассона, μ	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Относительное удлин. δ, %	Относи-тельное сужение ψ, %	Твердость НВ, МПа	Ударная вязкость KCU, МДж/м^2
Алюминий	2710	69 - 72	25 – 26,5	0,31	22	50	45	90	150	
Бериллий *	1850	300	145	0,03	-	140	0,8 – 1,3			
Железо (особой чис.)	7800	195 - 205	77 - 80	0,28	170	290	50	90	800	
Золото (отожженное)	19300	78 - 83	28,5	0,4	40	150	40	90	220	
Кобальт	8900	206	78,5	0,32	-	240	-	-	1250	
Кремний	2300	110 - 160	-	-		700	0	0	-	
Медь (отожженная)	8900	110 - 130	41,5 - 44	0,38	70	215	60	75	400	
Неодим (литое)**	7070/6800	38	15	0,28	165	170	11	-	-	
Ниобий (отожжен.)	8570	91 - 160	-	0,39	210	275	28	80	500	
Палладий (отожжен.)	12020	115 - 125	49 - 52	0,39	70	145	45	95	470	
Серебро (отожжен.)	10500	72 – 83,5	27 – 29,5	0,37	20 - 30	140 - 180	45	90	500	
Ст.3	7770	200 - 210	77 - 81	0,28 – 0,31	210 - 240	380 - 500	25 - 27	55 - 65	1310	
Сталь 45	7850	200 - 210	77 - 81	0,28 – 0,31	360	610	16	45	2290	0,6
Сталь 40Х	7800	200 - 210	77 - 81	0,28 – 0,31	800 - 850	1000 - 1050	9 - 12	45 - 50	2070 - 2400	0,6 – 0,9
20Х13 (после закалки и отпуска)	7900	200 - 210	77 - 81	0,28 – 0,31	1050	1200	10 - 18	45 - 60	2550	0,5 – 0,7
10ХН35ВТЮ (после закалки и старения)	7900-8200	200 - 210	77 - 81	0,28 – 0,31	950 - 1000	1320	20 - 25	40	-	0,75
40Х13	7800				1050	1200	3-8	-	-	-
Д1Т (штамповка)	2800	70 – 72,5	27 - 28	0,31 – 0,33	280	410	25			
Д16Т (лист, плита)	2780	70 – 72,5	27 - 28	0,31 – 0,33	320	450	18			
САС–1-50 пруток	2700	100			240	260 - 400	0,5 - 2,5			
АЛ2 (литье в землю)	2640				80	175	6		550	
КСП(САС–1-50,85%)	2500	100			280-300	1,0 – 1,2				
САС – 1 – 400	2700	100			240 - 350	1,0 – 4,2				
ВТ1-0		110 - 120	42 - 45	0,31 – 0,34	300 - 400	350 - 500	30	60		
ВТ6 (после отжига)		110 - 120	42 - 45	0,31 – 0,34	900	950 – 1050	8	30		0,3 – 0,5
ВТ6 (после закалки)		110 - 120	42 - 45	0,31 – 0,34	1050	1150	8	30		0,25

ПРИЛОЖЕНИЕ Таблица П2

Механические свойства материалов

Материал (состояние)	Плотность ρ , кг/м^3	Модуль Юнга E, ГПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ, %
Л96 (мягкое состояние)		102 – 115	234/400	50
ЛС63-3 (мягкое состоян.)		102 – 115	300–500/ 550–700	40–60/ 2 – 6
БрБ2 (мягкое состояние)	7500 – 9100	130	500/ 900	40/ 2
Мельхиор МНЖМц30-08-1	8900	145	400/ 600	45/ 4
Кварцевое стекло прозрачное	2200	0,65	650 (сжатие)	
Стеатит	2400 – 2800	53	470 -615	
Ситалл СТ – 50-1	2650		176 (изгиб)	
Ситалл пироксеновый	2900	0,14	400 (растяж.)	
Керамика Al_2O_3 (корунд)	3990	382	4000 (сжатие)	
Керамика BeO	3020	272	2100 (сжатие)	
Винипласт листовой (поливинил-хлорид)	1380 – 1430	2,6	70 -120	
Гетинакс электротехнический	1280 – 1450	10	80 –100 (изгиб)	0,012 – 0,025
Пенопласт листовой	1320 – 1400		80 –100 (раст.)	0,012 – 0,016
Полиметилметакрилат литьевой (орг. стекло)	1180 – 1200	2,6 – 4,1	90 – 120 (изгиб)	0,08 – 0,18
Полиэтилен высокого давления	900 – 940		12 – 16	400 – 600
Полиэтилен низкого давления	950 – 960	0,14 – 0,25	20 – 30	300 – 800
Стеклотекстолит электротехнический	1600 – 1900	18,85 - 30	150– 420 (изгиб)	0,05 – 0,2
Текстолит конструкционный	1300 – 1400		120 – 160 (изгиб)	0,03
Фторопласт 4	1900 – 2200	13 - 35	250 – 500	0,1
Пенопласт	1400		80 – 110	0,12 – 0,16
Кости черепа	1700 – 2000			
Кожа человека	860			

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П3

Теплофизические и электрические свойства материалов

Материал (состояние)	Теплофизические и электрические свойства		
	α, 10^{-6} K^{-1} при $t=20^0C$	λ, 25^0C Вт/(м·К),	ρ_0, 25^0 С, Ом·см
Алюминий	23,8	237	$0{,}594 \cdot 10^{-9}$
Бериллий	12,4	200	$13{,}5 \cdot 10^{-9}$
Железо (особой чистоты)	12,2	80	$14{,}3 \cdot 10^{-9}$
Золото (отожжённое)	14,2	317	$5{,}5 \cdot 10^{-9}$
Кобальт	12,2	100	$90{,}75 \cdot 10^{-9}$
Кремний	2,4	150	
Медь (отожжённоя)	16,5	401	$0{,}589 \cdot 10^{-9}$
Неодим (литье)		17	
Ниобий (отожжённое)	7,1	54	$67{,}9 \cdot 10^{-9}$
Палладий (отожжённое)	11,75	72	$12{,}3 \cdot 10^{-9}$
Серебро (отожжённое)	19,5	429	$0{,}621 \cdot 10^{-9}$
Ст.3	11,7	88	
Сталь 45	11,6	79	
Сталь 40Х		48	
20Х13 (после закалки и отпуска)	10		
10ХН35ВТЮ (после закалки и старения)	16,0	14 – 15	
Д1Т (штамповка)	22,9	170	
Д16Т (лист, плита)	22,7	120	
КСП	12,7 - 13		
САС–1-400	14, 5 – 15,51		
САС–1-50 пруток	12 –12,5		
АЛ2 (литье в землю)	21,1	130	
ВТ6 (после отжига)	8,6	8,4	
ВТ6 (после закалки и стар.)	9,1		
Л96 (мягкое состояние)	17	110	
ЛС63-3 (мягкое сост.)		110	
БрБ2 (мягкое состояние)	17,0	11	
Al_2O_3 (96%)	7 –10	17 – 19	$10^{13} - 10^{15}$
Стеатит	6 – 11,6	4,15 – 4,19	$!0^{8} - 10^{11}$
Текстолит	25		
Боросиликатное стекло	0,8 – 6	0,84 – 1,3	
Алюмосиликатное стекло	8 – 10		
Кварцевое стекло прозрачное	0,42	0,13	
Ситалл СТ –50-1	5,2	1,35	10^{14}
Керамика Al_2O_3 (корунд)	8,1	40	$10^{13} - 10^{15}$
Керамика BeO	5,42	370	10^{14}
Керамика BeO, 95,5%	8,0	146	10^{14}
Винипласт листовой (поливинилхлорид)	60 – 90		10^{16}
Фторопласт 4			10^{19}
Пенопласт листовой	27 – 79		
Полиметилметакрилат литьевой	80		
Полиэтилен высокого давления	220 – 550		$10^{16} - 10^{17}$
Полиэтилен низкого давления	110 – 500		
Стеклотекстолит электротехнический	8 – 9		
Текстолит конструкционный	5,5		

Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева

Периоды	Ряды	I (а / б)	II (а / б)	III (а / б)	IV (а / б)	V (а / б)	VI (а / б)	VII (а / б)	VIII б	VIII б	VIII б	VIII а
1	1	H 1 ГЕК ВОДОРОД										He 2 ГЕЛИЙ
2	2	Li 3 ОЦК ЛИТИЙ	Be 4 ГЕК БЕРИЛЛИЙ	B 5 ТЕТ БОР	C 6 АЛМ УГЛЕРОД	N 7 ГЕК АЗОТ	O 8 КУБ КИСЛОРОД	F 8 МОН ФТОР				Ne 10 ГЦК НЕОН
3	3	Na 11 ОЦК НАТРИЙ	Mg 12 ГЕК МАГНИЙ	Al 13 ГЦК АЛЮМИНИЙ	Si 14 АЛМ КРЕМНИЙ	P 15 КУБ ФОСФОР	S 16 РОМ СЕРА	Cl 17 РОМ ХЛОР				Ar 18 ГЦК АРГОН
4	4	K 19 ОЦК КАЛИЙ	Ca 20 ГЦК КАЛЬЦИЙ	21 ГЕК Sc СКАНДИЙ	22 ГЕК Ti ТИТАН	23 ОЦК V ВАНАДИЙ	24 ОЦК Cr ХРОМ	25 ОЦК Mn МАРГАНЕЦ	26 ОЦК Fe ЖЕЛЕЗО	27 ГЕК Co КОБАЛЬТ	28 ГЦК Ni НИКЕЛЬ	
	5	29 ГЦК Cu МЕДЬ	30 ГЕК Zn ЦИНК	Ga 31 ГЕК ГАЛЛИЙ	Ge 32 АЛМ ГЕРМАНИЙ	As 33 РМЭ МЫШЬЯК	Se 34 ГЕК СЕЛЕН	Br 35 РОМ БРОМ				Kr 36 ГЦК КРИПТОН
5	6	Rb 37 ОЦК РУБИДИЙ	Sr 38 ГЦК СТРОНЦИЙ	39 ГЕК Y ИТТРИЙ	40 ГЕК Zr ЦИРКОНИЙ	41 ОЦК Nb НИОБИЙ	42 ОЦК Mo МОЛИБДЕН	43 ГЕК Tc ТЕХНЕЦИЙ	44 ГЕК Ru РУТЕНИЙ	45 ГЦК Rh РОДИЙ	46 ГЦК Pd ПАЛЛАДИЙ	
	7	47 ГЦК Ag СЕРЕБРО	48 ГЕК Cd КАДМИЙ	In 49 ТЕТ ИНДИЙ	Sn 50 ТЕТ ОЛОВО	Sb 51 РМЭ СУРЬМА	Te 52 ГЕК ТЕЛЛУР	I 53 РОМ ИОД				Xe 54 ГЦК КСЕНОН
6	8	Cs 55 ОЦК ЦЕЗИЙ	Ba 56 ОЦК БАРИЙ	57 ГЕК La* ЛАНТАН	72 ГЕК Hf ГАФНИЙ	73 ОЦК Ta ТАНТАЛ	74 ОЦК W ВОЛЬФРАМ	75 ГЕК Re РЕНИЙ	76 ГЕК Os ОСМИЙ	77 ГЦК Ir ИРИДИЙ	78 ГЦК Pt ПЛАТИНА	
	9	79 ГЦК Au ЗОЛОТО	80 РМЭ Hg РТУТЬ	Tl 81 ГЕК ТАЛЛИЙ	Pb 82 ГЦК СВИНЕЦ	Bi 83 ГЦК ВИСМУТ	Po 84 ПК ПОЛОНИЙ	At 85 АСТАТ				Rn 86 ГЦК РОДОН
7	10	Fr 87 ОЦК ФРАНЦИЙ	Ra 88 ОЦК РАДИЙ	89 ГЦК Ac* АКТИНИЙ	104 Rf РЕЗЕРФОРДИЙ	105 Db ДУБНИЙ	106 Sg СИБОРГИЙ	107 Bh БОРИЙ	108 Hs ХАССИЙ	109 Mt МЕЙТНЕРИЙ	110 Uun УНУННИЛИЙ	Uuu 111 УНУНУНИЙ

*ЛАНТАНОИДЫ

57 La ЛАНТАН	58 Ce ЦЕРИЙ	59 Pr ПРАЗЕОДИМ	60 Nd НЕОДИМ	61 Pm ПРОМЕТИЙ	62 Sm САМАРИЙ	63 Eu ЕВРОПИЙ	64 Gd ГАДОЛИНИЙ	65 Tb ТЕРБИЙ	66 Dy ДИСПРОЗИЙ	67 Ho ГОЛЬМИЙ	68 Er ЭРБИЙ	69 Tm ТУЛИЙ	70 Yb ИТТЕРБИЙ	71 Lu ЛЮТЕЦИЙ

*АКТИНОИДЫ

89 Ac АКТИНИЙ	90 Th ТОРИЙ	91 Pa ПРОТАКТИНИЙ	92 U УРАН	93 Np НЕПТУНИЙ	94 Pu ПЛУТОНИЙ	95 Am АМЕРИЦИЙ	96 Cm КЮРИЙ	97 Bk БЕРКЛИЙ	98 Cf КАЛИФОРНИЙ	99 Es ЭЙНШТЕЙНИЙ	100 Fm ФЕРМИЙ	101 Md МЕНДЕЛЕВИЙ	102 No НОБЕЛИЙ	103 Lr ЛОУРЕНСИЙ

Тип кристалла: ГЦК – гранецентрированный кубический, ОЦК – объёмноцентрированный кубический, КУБ – кубический, ПК – простой кубический, ТЕТ – тетрагональный, РОМ – ромбический, ГЕК – гексагональный, АЛМ – тип алмаза, РМЭ – ромбоэдрический, МОН – моноклинный

ЛИТЕРАТУРА К ЧАСТИ II

1. Ачкасов Н.А., Терган В.С., Козлов В.И. Технология точного приборостроения: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 351 с.
2. Валетов В.А., Кузьмин Ю.П., Орлова А.А., Третьяков С.Д. Технология приборостроения. Учебное пособие, – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008 – 336 с.
3. Гормаков А.Н. Технология приборостроения. Учебное пособие. –Томск: Изд. ТПУ, 1999. – 240 с.
4. Гормаков А.Н. Технология приборостроения. Технология конструкционных материалов. Сборка соединений: Учебное пособие. –Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 184 с.
5. Гаврилов А.Н. Основы технологии приборостроения: Учебник для втузов. – М.: Высшая школа, 1976. – 328 с.
6. Гаврилов А.Н. Технология авиационного приборостроения: Учебник для вузов. – М. Машиностроение, 1981. – 480 с.
7. Гаврилов А.Н. Технология изготовления деталей авиационных приборов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
8. Михайлов М.М. Основы электротехнологий: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 1998. – 239 с.
9. Орлов К.Я., Пархимович В.А. Авиационные материалы. – М.: Транспорт, 1993. – 207 с.
10. Справочник технолога-приборостроителя: В 2-х томах. – 2-е изд., перераб. и доп. Т.1/ Под ред. П.В. Сыроватченко. – М.: Машиностроение, 1980. – 607 с.
11. Справочник технолога-приборостроителя: В 2-х томах. – 2-е изд., перераб. и доп. Т. 2 / Под ред. Е.А. Скороходова. – М.: Машиностроение, 1980. – 466 с.
12. Технологические процессы машиностроительного производства: Альбом. Часть I. – М.: Изд-во МГТУ Станкин, 1993. – 256 с.
13. Технологические процессы машиностроительного производства. Альбом. Часть II. – М.: Изд-во МГТУ Станкин, 1993. – 211 с.
14. Технология деталей радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ С.Е. Ушакова, В.С. Сергеев, А.В. Ключников и др. Под ред. С.Е. Ушаковой. – М.: Радио и связь, 1986. – 256 с.
15. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи.: Пер. с англ.– М.: Издательской дом «Вильямс», 2004. – 240 с.: ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

ГОРМАКОВ Анатолий Николаевич

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор
доктор технических наук,
профессор В.С. Дмитриев

Компьютерная верстка *А.Н. Гормаков*

Подписано к печати 09.11.2010. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 19,77. Уч.-изд. л. 17,88.
Заказ 1872-10. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru